



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

SIMULACE TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ TYČOVÉ OCELI NA INDUKČNÍCH ZUŠLECHŤOVACÍCH LINKÁCH

THE SIMULATION OF STEEL ROD IMPROOVEMENT BY THE INDUCTION LINES HEAT
TREATMENT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID CHMIEL

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MILOSLAV KOUŘIL, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Chmiel

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Materiálové inženýrství (3911R011)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Simulace tepelného zpracování tyčové oceli na indukčních zušlechťovacích linkách

v anglickém jazyce:

The simulation of steel rod improvement by the induction lines heat treatment

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Hlavním cílem práce je vypracování literární rešerše na téma indukčního ohřevu a kalení a jeho porovnání se standardním ohřevem a ponorným způsobem zušlechťování. Dále se bude student zabývat možnostmi simulace tepelného zpracování na indukčních zušlechťovacích linkách v programu QTSTEEL a simulací vzorových značek ocelí.

Cíle bakalářské práce:

Vypracování souhrnné literární rešerše na dané téma a zjištění možností simulace tepelného zpracování tyčové oceli na indukčních zušlechťovacích linkách.

Seznam odborné literatury:

- [1] HOLM, T.; OLSSON, P.; TROELL, E.: Steel and its Heat Treatment - a handbook.
Möln dal: Swerea IVF, 2012. ISBN 987-91-86401-11-5
- [2] RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R.; BLACK, M.: Handbook of Induction Heating.
New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 0-8247-0848-2

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/13.

V Brně, dne 22.4.2013





prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
Ředitel ústavu



prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá možnostmi simulací tepelného zpracování indukčním způsobem. Literární rozbor je zaměřen na indukční způsob zušlechťování, jeho fyzikální podstatu a na jeho využití pro tepelné zpracování. Pro úplnost je v závěru provedeno porovnání různých způsobů zušlechťování. V experimentální části je popsán budoucí způsob zušlechťování tyčové oceli ve firmě Třinecké železářny a.s. Dále je zde uveden způsob simulace tepelného zpracování v programu QTSteel a na to navazující návrhy parametrů pro průběžnou zušlechťovací linku.

Abstrakt

Bachelor thesis deals with possibilities of simulation of induction heat treatment. Literary analysis is focused on the method of induction treatment, the physical nature and its use for the heat treatment. For completeness is in the end comparison of different methods of heat treatment. The experimental part describes the future of quenching and tempering of steel bars in company Třinecké železářny a.s. Also is contained method of simulation of the heat treatment in computer program QTSteel and the subsequent design of parameters for a continuous processing.

Klíčová slova

Tepelné zpracování, indukce, tyčová ocel, simulace, qtsteel

Keywords

Heat treatment, induction, steel bars, simulation, qtsteel

Bibliografická citace

CHMIEL, D. Simulace tepelného zpracování tyčové oceli na indukčních zušlechťovacích linkách. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 46 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Miloslav Kouřil, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně, za použití uvedených literárních zdrojů.

V Brně 28. 5. 2013

David Chmiel

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Miloslavu Kouřilovi, CSc. a konzultantovi Ing. Januszovi Dänemarkovi, PhD. za vedení a rady při řešení této práce.

Obsah

1. Úvod	3
2. Literární přehled	4
2.1 Indukční tepelné zpracování	4
2.2 Indukční kalení	6
2.2.1 Způsoby ohřevu	7
2.2.2 Volba frekvence	9
2.2.3 Délka ohřevu	9
2.2.4 Induktory	10
2.3 Popouštění	12
2.4 Vnitřní pnutí a trhliny	15
2.5 Rozdíly mez indukčním a konvenčním způsobem	17
3. Cíle práce	19
4. Experimentální část	20
4.1 Zušlechťovací linka v Třineckých železárnách a.s.	20
4.2 Simulace v programu QTSteel	23
4.2.1 Kruhové tyče s průměrem 80 mm	26
4.2.2 Kruhové tyče s průměrem 40 mm	28
4.2.3 Kruhové tyče s průměrem 20 mm	29
4.2.4 Porovnání s konvenčním způsobem	30
4.3 Porovnání trubek	32
4.3.1 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 203 mm	32
4.3.2 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 355,6 mm	34
4.3.3 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 193,7 mm	34
4.3.4 Trubky z oceli 42CrMo4 s průměrem 203 mm	35
4.3.5 Trubky z oceli 42CrMo4 s průměrem 244,5 mm	35
5. Diskuze výsledků	37
6. Závěr	39

7. Použitá literatura	40
8. Přehled použitých značek a symbolů	42
9. Seznam příloh	43
10. Přílohy	44

1. Úvod

Při výrobě zušlechťených válcovaných polotovarů (tyčí, trubek, aj.) lze použít klasické metody ohřevu v peci, kalení ve vhodném prostředí a popouštění opět v peci nebo využít indukční ohřev, jako technologii na vyšší technické úrovni, s předpoklady úspor investic, prostoru a energie a zkrácení průběžné doby výroby produktu.

Indukční ohřev je ve strojírenství využíván zejména pro povrchové kalení. V hutnictví je ho však možno využít i pro ohřev a následné kalení celých i značně velkých průřezů. Pro ten účel je nutno zvolit správné zařízení, použitý kmitočet a řídicí systém měření teploty a pohybu, který je u tohoto dynamického přístupu k tepelnému zpracování (statický způsob = pec vyhřátá na kalicí teplotu...atp.) základem opakovaného dosahování shodného produktu. Protože, jak již bylo řečeno, se jedná o proces dynamický, je obtížné navrhnout a posoudit parametry procesu, pouze na základě zkoušek. Proto bylo využito počítačové simulace teplotního pole, strukturních přeměn a mechanických vlastností různých typů zpracovávaných polotovarů ještě před vlastním uvedením zařízení do provozu. Tento krok podle předpokladu usnadní a urychlí zprovoznění zařízení, provedení prvních technologických zkoušek a celkové uvedení zařízení do plného provozu.

Pro počítačovou simulaci byl použit software QTSteel, který je i přes svoji ekonomickou dostupnost na dostatečně pokročilé technické úrovni a lze u něj předpokládat velmi dobrou shodu mezi simulacemi a pozdějšími reálnými experimenty.

2. Literární přehled

2.1 Indukční tepelné zpracování

Indukční ohřev využívá vzniku tepla přímo v ohřívaném materiálu a jedná se tedy o druh přímého ohřevu. Teplo není předáváno z okolního prostředí (pec), ale vzniká v určité povrchové vrstvě materiálu. Dochází tak k menším energetickým ztrátám a dále k časovým i nákladovým úsporám. Indukční ohřev je využíván nejčastěji pro povrchové tepelné zpracování, ale též jako ohřev pro tváření, ohřev v tavicích pecích, udržování teploty tekutého kovu apod. K ohřevu se využívá elektromagnetické indukce. Součást je umístěna ve střídavém magnetickém poli a dochází v ní ke vzniku tepla hysterezními ztrátami při střídavé magnetizaci, ale zejména v důsledku vzniku vířivých proudů pod povrchem ohřívaného předmětu. [1, 2]

Elektromagnetická indukce, na které je tato metoda založena, byla objevena Michaelem Faradayem v roce 1831. Začátkem 20. století se tento fyzikální jev začal používat k ohřevu kovů a ve dvacátých letech 20. století došlo k většímu využití a použití pro indukční kalení ve společnosti Midvale Steel. Indukční středofrekvenční ohřev zde byl použit pro kalení hřídel při frekvencích v rozmezí 1920 až 3000 Hz. S rozvojem měničů kmitočtu v 60. letech došlo ke zlepšení účinnosti celého procesu a metoda i v dnešní době prochází intenzivním rozvojem. [1, 2]

Přivedením střídavého proudu do induktoru vzniká magnetické pole. Induktor je vodič elektrického proudu a magnetické pole je soustředěno uvnitř a v okolí tohoto induktoru. Umístěním vodivého tělesa do induktoru se těleso stane součástí magnetického obvodu a začne se zahřívat na výše uvedených principech. Ohřev vířivými proudy je možný u všech elektricky vodivých materiálů. Ohřev střídavou magnetizací je možný pouze u materiálů feromagnetických, díky hysterezním ztrátám a znamená méně než 10% z celkového ohřevu (záleží na frekvenci a síle magnetického pole). [2]

Hustota elektrického proudu je největší na povrchu a se zvyšující se hloubkou se snižuje. Tomuto jevu se říká povrchový jev. Hloubka průniku elektromagnetického pole se počítá do 37% proudové hustoty povrchu a dá se vyjádřit vztahem:

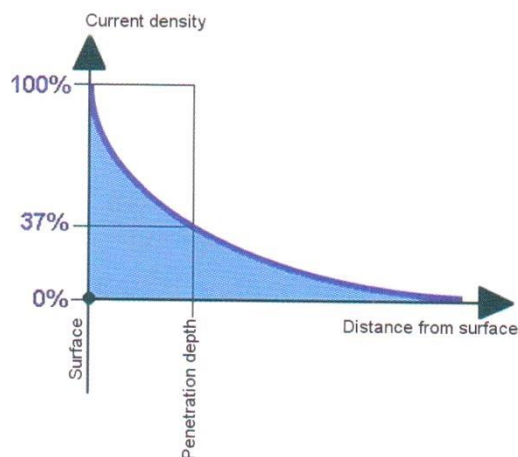
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad (1)$$

δ hloubka průniku elektromagnetického pole, [m]

ρ měrný elektrický odpor, [Ωm]

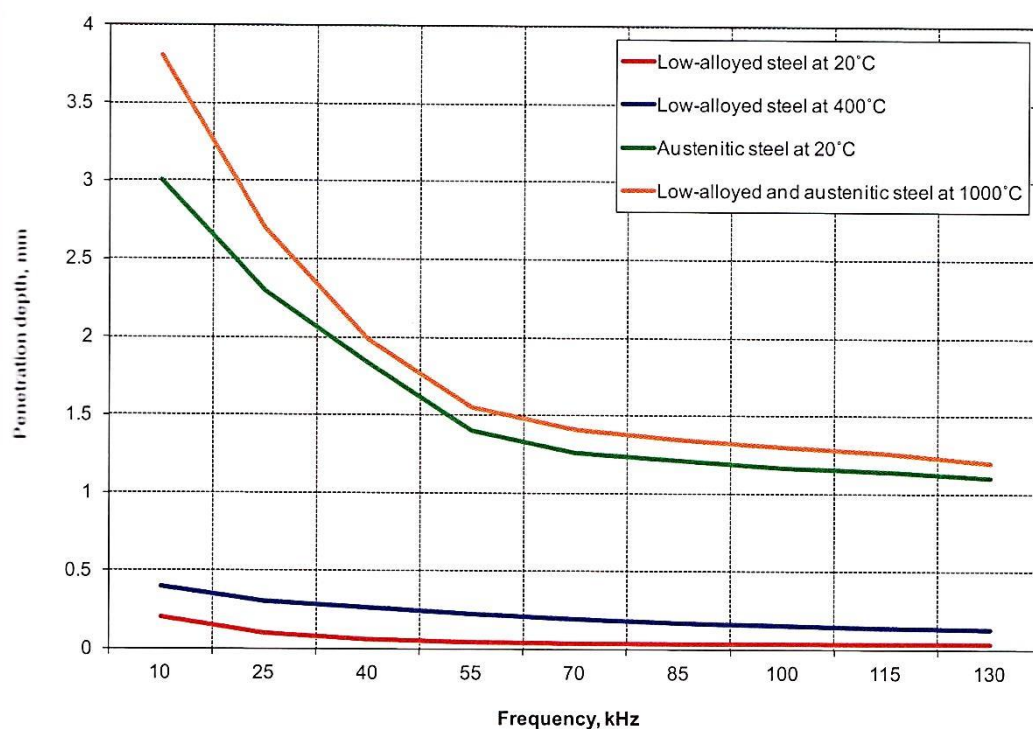
μ relativní permeabilita,

f frekvence, [Hz]



Obr. 1 Závislost hustoty elektrického proudu na vzdálenosti od povrchu [2]

Elektrický odpor a relativní permeabilita jsou závislé na teplotě. Se vzrůstající teplotou se zvyšuje hloubka průniku. Naopak se vzrůstající frekvencí se hloubka průniku zmenšuje. Záleží zde i na chemickém složení, u nízkoalloyovaných ocelí je hloubka průniku při nižších teplotách výrazně vyšší než například u austenitických ocelí. Závislost hloubky penetrace na frekvenci a materiálu můžeme vidět na obrázku č. 2. Používané frekvence se dělí do tří kategorií: nízké (do 10 kHz), střední (od 10 kHz do 70 kHz) a vysoké (nad 70 kHz). [2]

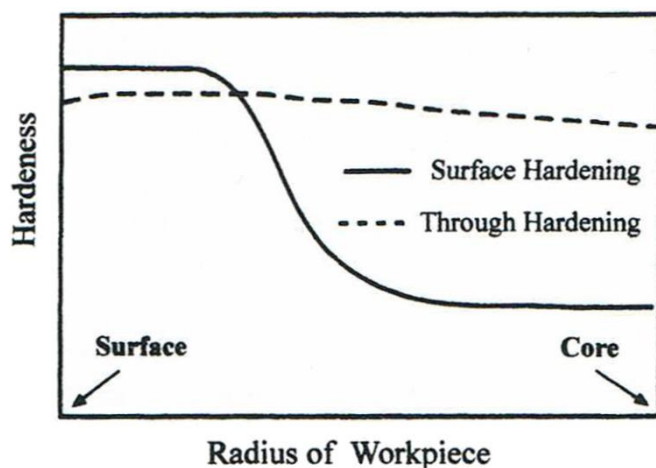


Obr. 2 Závislost hloubky prokalení na frekvenci [2]

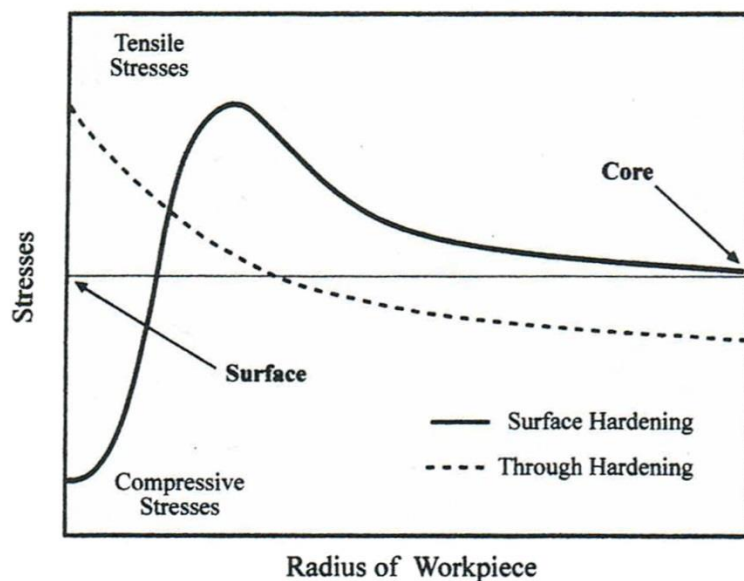
2.2 Indukční kalení

Kalení je jeden z nejpoužívanějších způsobů tepelného zpracování indukci. Provádí se s cílem získat požadovanou strukturu a mechanické vlastnosti. Při indukčním kalení může docházet k ohřevu at' celé nebo jenom části součásti. Ta se ohřívá na austenitizační teplotu. Dále dochází k výdrži na této teplotě, než dojde k vytvoření austenitu ve struktuře a poté dojde k rychlému ochlazení, jež vede k vytvoření martenzitu. [1]

Tři nejčastější způsoby indukčního kalení jsou: povrchové kalení, objemové kalení a selektivní kalení. Cílem povrchového kalení je vznik martenzitické vrstvy na povrchu, která zlepšuje mechanické vlastnosti bez dopadu na zbytek součásti. Hloubka vrstvy se počítá do hloubky s obsahem martenzitu větším než 50%. Pod touto vrstvou dochází k rapidnímu snížení tvrdosti. Vzdálenost od povrchu do hloubky s úbytkem tvrdosti 10 HRC je známá jako účinná hloubka vrstvy. [1]



Obr. 3 Závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu [1]



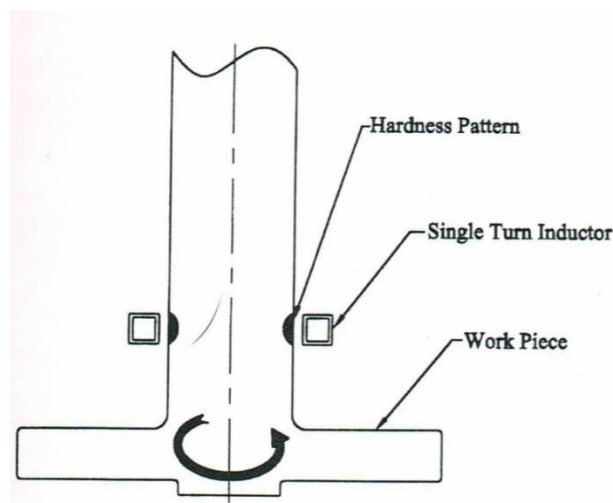
Obr. 4 Závislost vnitřního pnutí na vzdálenosti od povrchu [1]

Na rozdíl od povrchového kalení, u objemového kalení je cílem dosáhnout martenzitické struktury nejen v povrchové vrstvě, ale v celém průřezu. Ohřev se musí provádět nad austenitizační teplotu, musí zde být dostatečná prodleva a poté je třeba rychlé ochlazení. Schopnost materiálu dosáhnout prokalení v celém průřezu závisí na prokalitelnosti materiálu, na kalících podmínkách, velikosti zrna, na geometrii zpracovávané součásti a na tepelné vodivosti materiálu. [1]

U selektivního kalení se kalí pouze jedna část z celé součásti. Tato metoda je výhodná v případě, kdy je potřeba získat v určité části jiné mechanické vlastnosti. Další výhodou je úspora času a energie. [1]

2.2.1 Způsoby ohřevu

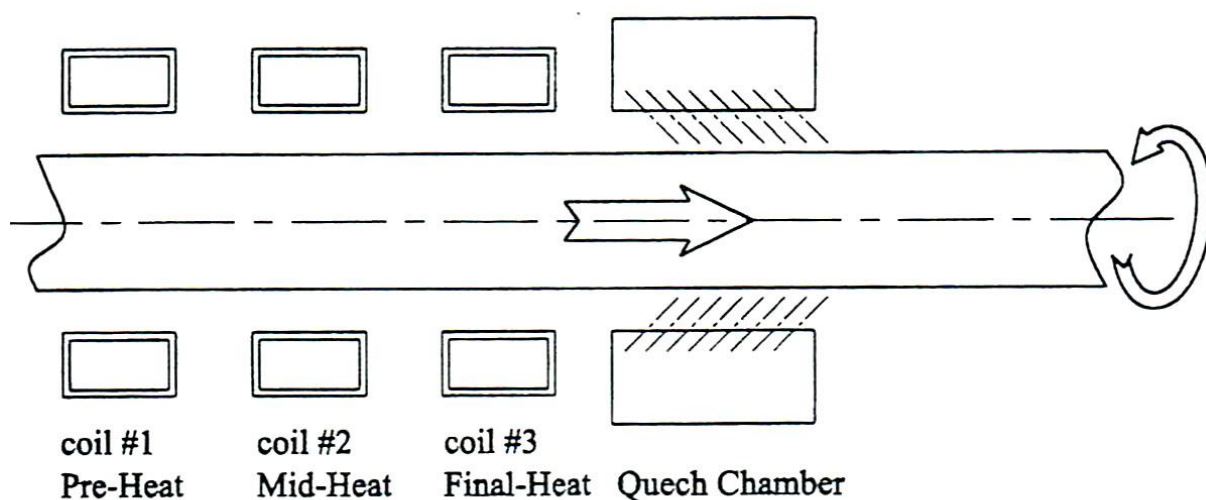
Prvním způsobem ohřevu je jednorázový statický ohřev. Tento způsob je výhodný pro selektivní kalení. Kalená součást se vloží do induktoru a následně se ohřívá. Po dosažení austenitizační teploty je jednorázově zakalena, např. vysunutím z induktoru dolů do kalící lázně, nebo je ohřátý průměr přesunut do sprchy pod induktorem. Rotační součásti se zpravidla ohřívají a kalí za rotace. Servopohony jsou realizovány pneumaticky, hydraulicky či elektricky. [1]



Obr. 5 Jednorázový ohřev [1]

Druhým způsobem je kontrolovaný ohřev. Kalená součást je uchycena do upínacího přípravku a vložena do induktoru. Po začátku ohřevu se součást začne pohybovat. Tento způsob umožňuje měnit rychlost, čímž se zajistí různé ohřívání v různých částech zpracovávané součásti. Takto se většinou zpracovávají poloosy a kolejnice. [1]

Dalším způsobem ohřevu je průběžný ohřev. Tento způsob se většinou používá pro dlouhé tyče s průměrem nad 25 mm a dá se použít jak pro kalení, tak i pro popouštění nebo jako ohřev pro tváření. Ohřev je postupně zajištěn třemi induktory. V závislosti na použití mohou být stejné a použitá frekvence a výkon mohou být také stejné nebo může mít každý induktor jiný tvar, frekvenci a výkon. Induktory k předehřevu je vhodné použít u materiálů, jež mají sklony ke vzniku trhlin. Nižší frekvence se volí v případě ohřevu celého průřezu (tváření, zušlechťování). [1]



Obr. 6 Průběžný ohřev [1]

Posledním způsobem ohřevu je pulzní ohřev. Využívá se zde krátkých tepelných rázů, které umožňují kontrolovat a udržovat požadovanou teplotu povrchu bez přehřátí. Pulzní způsob je také možné použít v kombinaci s dvou-frekvenčním ohřevem, kdy se provádí přehřev s nízkou frekvencí a poté dochází k tepelným rázům s vysokou frekvencí. Délka každého pulzu záleží na velikosti a tvaru zpracovávané součásti a bývá v rozmezí od 0,2 do 3 sekund. Tento způsob se používá pro zpracování vysokouhlíkových ocelí a litin se sklony k vytváření trhlin. [1]

2.2.2 Volba frekvence

Volba frekvence je velice důležitá, neboť na ni záleží hloubka prokalení. Podstata povrchového kalení je založena na povrchovém jevu. Z rovnice č. 1 je jasné, že hloubka průniku závisí na frekvenci, měrném elektrickém odporu a relativní permeabilitě. Při kalení je třeba rozlišovat hloubku průniku elektromagnetického pole a požadovanou hloubku kalené vrstvy. Při správně zvolené frekvenci by měla být hloubka průniku elektromagnetického pole 1,2 až 3krát větší, než požadovaná hloubka zakalení. Výsledná frekvence se dá vypočítat z těchto dvou vztahů:

$$\left(\frac{5}{x_{hd}}\right) < \text{Frekvence [kHz]} < \left(\frac{16}{x_{hd}}\right); (2)$$

$$\text{Frekvence} = \left(\frac{8,5}{x_{hd}}\right)^2 \text{ [kHz]}; (3)$$

x_{hd} = požadovaná hloubka prokalení

Požadované hloubky zakalení je také možné dosáhnout kombinací frekvence a hustoty elektrického proudu. Pro malou hloubku je možné použít menší než doporučenou frekvenci, ale je nutné použít větší proudovou hustotu s kratší dobou ohřevu. Naopak pro hlubší vrstvu je možné použít vyšší frekvence, menší proudovou hustotu a delší čas ohřevu. [1]

V případech kdy je potřeba prokalení celého průřezu součásti je důležitá správná volba frekvence. Ta se pohybuje většinou v nízkém až středním rozsahu (500-80000 kHz). Na volbu frekvence má veliký vliv velikost zpracovávané součásti. Pro objemové kalení je výhodné použít dvoufázový ohřev. [1]

2.2.3 Délka ohřevu

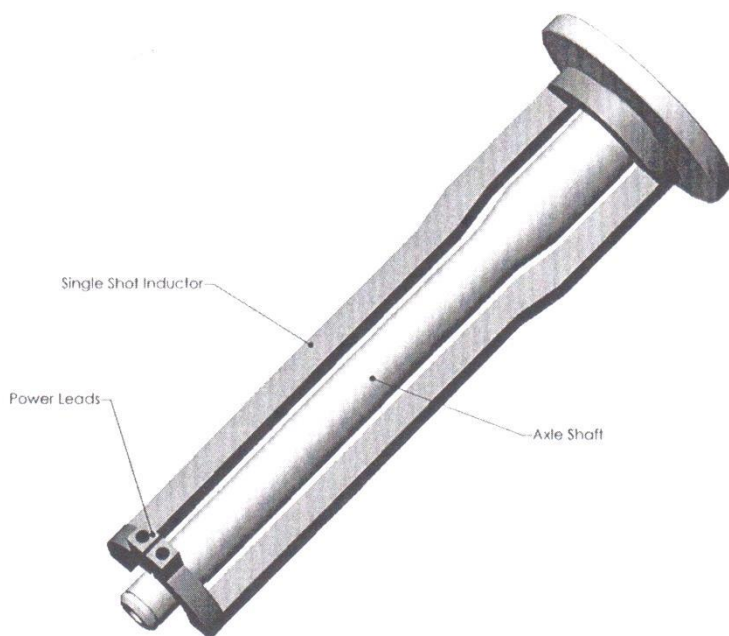
Dalším parametrem, který má vliv na výslednou strukturu je délka ohřevu. Při indukčním ohřevu je možné ohřát materiál velice rychle, což ale nemusí být vždy žádané. Při velice rychlém ohřevu se součást ohřívá pouze v oblasti výskytu vířivých proudů a to má vliv na nízkou teplotu jádra. Výsledkem by tedy byl veliký rozdíl v mechanických vlastnostech povrchu a jádra. Při pomalejší ohřevu se díky tepelné vodivosti ohřívá dostatečně

i jádro. Důležité je najít vhodnou dobu ohřevu, aby byl ohřev pokud možno co nejkratší (vzhledem ke vzniku trhlin), ale aby byl materiál prokalen do požadované hloubky.

2.2.4 Induktory

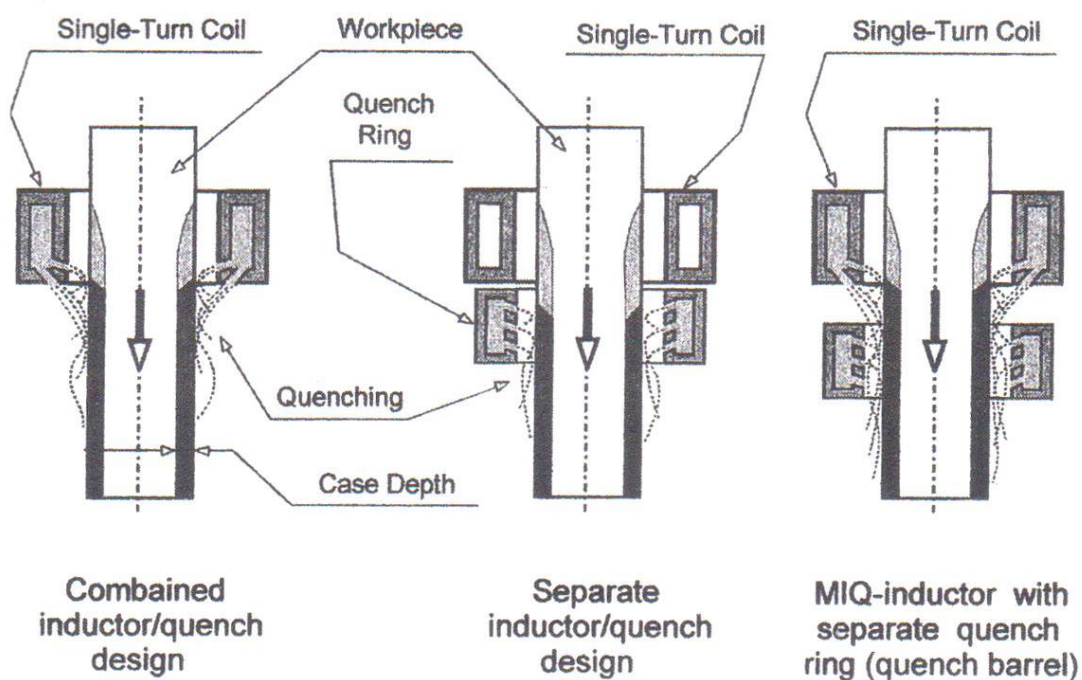
Jak už bylo řečeno v kapitole 1, induktor je elektrický vodič (cívka), v jehož okolí po přivedení střídavého proudu vzniká magnetické pole. Nejintenzivnější elektromagnetické pole je uvnitř induktoru, pokud je takto vytvarován. Induktory však mohou ohřívat i pouhým přiblížením k deskovitému plochému povrchu, nebo dokonce vnitřní povrch díry. V závislosti na druhu ohřevu, geometrii, požadované tvrdosti a používané frekvenci se používá mnoho druhů induktorů.

Prvním druhem induktorů, jsou induktory „single-shot“. Tyto induktory se vyrábějí z mědi. Tok elektrického proudu je zde axiální, proto zde musí ohřev probíhat za rotace, aby byla hloubka kolem celého obvodu rovnoměrná. Rychlost otáček je v rozmezí od 120 do 500 otáček za minutu. Při kratších ohrevech je nutno použít vyšší rychlost otáčení a mělo by dojít k alespoň k pěti otáčkám za dobu ohřevu, v závislosti na velikosti induktoru. Obvykle má tento typ induktorů tvar podkovy, vyrábějí se ale v různých tvarech a velikostech a proto se také často používají pro neobvyklé tvary a průměry. Další výhodou je krátký čas ohřevu. U single-shot induktorů je průměrný čas ohřevu od 2 do 17 sekund, naproti tomu u průběžných induktorů je to rozmezí od 15 do 50 sekund. Nevýhodou je přehřívání, kvůli němuž je nutný chladicí okruh, oddělený od okruhu s chladicí kapalinou pro kalení. [1, 2]



Obr. 7 Příklad Single-shot induktoru [1]

Průběžné induktory se vyznačují možností pohybovat se. Hlavní výhodou průběžných induktorů je jednoduchá automatizace celého procesu a rychlé přizpůsobení různým nastavením. Induktory jsou většinou vyráběny z měděných tyčí, mechanicky odolné a mají vysokou trvanlivost. Nádrž s chladicí kapalinou může být integrovaná přímo v induktoru. Proud chladicí kapaliny by měl mířit asi do vzdálenosti 2 cm a měl by být orientován tak, aby nenastala možnost rozstříku kapaliny zpátky na induktor (Obr. 8a). Často využívanou možností je samostatná sprcha pod induktorem (Obr. 8b.), dále je možná kombinace integrované a samostatné sprchy, zejména pro vyšší výkony ohřevu a tlustší prokalené vrstvy (Obr. 8c.). [1]

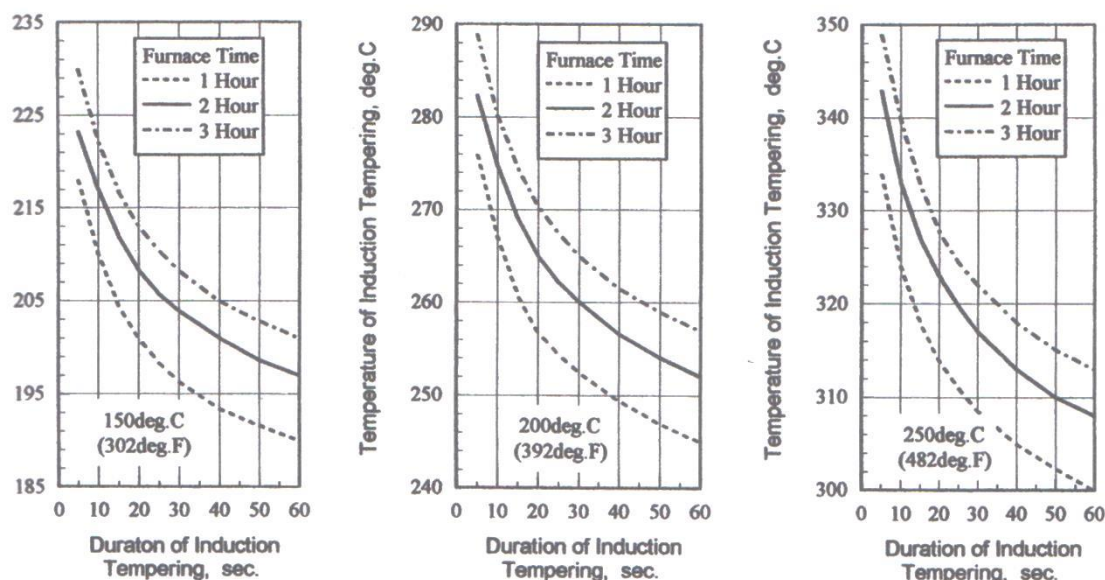


Obr. 8 Příklady chladících hlav integrovaných v induktoru [1]

2.3 Popouštění

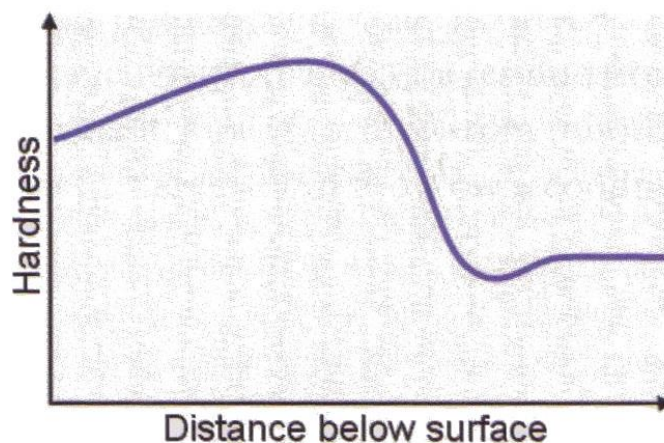
Po kalení je dalším procesem popouštění. To se provádí pro zvýšení houževnatosti a plasticity a pro snížení vlastní napjatosti, a to bez významného snížení tvrdosti. Vznik martenzitické struktury během kalení způsobuje velikou tvrdost, křehkost materiálu a také zvyšuje náchylnost ke vzniku trhlin. Pro popouštění po indukčním kalení se používá tři různých metod: popouštění konvenční metodou v peci, indukční popouštění a popouštění vnitřním teplem. [1, 3]

Popouštění konvenční metodou v peci po indukčním kalení je stejné jako u jiných způsobů kalení. Tato metoda je časově náročná, trvá přibližně 2-3 hodiny, naproti tomu indukčním popouštěním trvá v řádu desítek sekund. Popouštění v peci se používá spíše pro tvarově složité součásti s rozdílnou tloušťkou. [2]



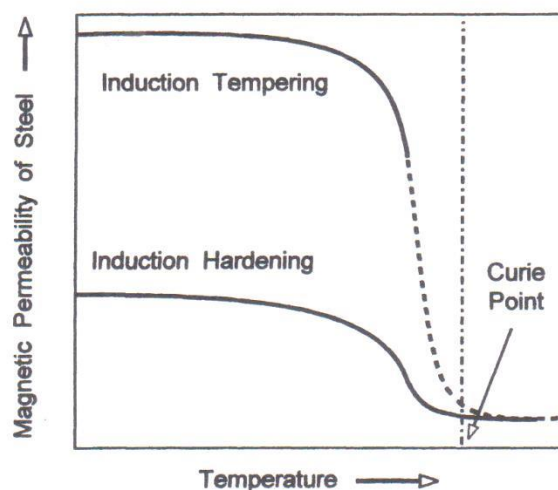
Obr. 9 Porovnání doby popouštění v peci a pomocí indukce [1]

Pro správné indukční popouštění je důležité určit vhodnou metodu popouštění, tvar induktoru a frekvenci. Teploty popouštění jsou nižší, než je Curieho teplota a proto je zpracováváný materiál magnetický. Díky tomu se k ohřevu vířivými proudy přidává i teplo vznikající hysterezními ztrátami. Pro popouštění je možné použít stejnou metodu ohřevu a stejné induktory, jaké byly použity pro kalení. V tomto případě je hloubka průniku elektrického pole menší a proto je potřeba oproti kalení zvýšit čas ohřevu. Příliš krátký čas ohřevu by mohl vést k setrvání nepopuštěného martenzitu pod povrchem a vnitřního pnutí. To by vedlo k nechtěnému snížení tvrdosti povrchu, jak ukazuje obrázek 10. [1, 2]



Obr. 10 Závislost tvrdosti po špatně provedeném popouštění [2]

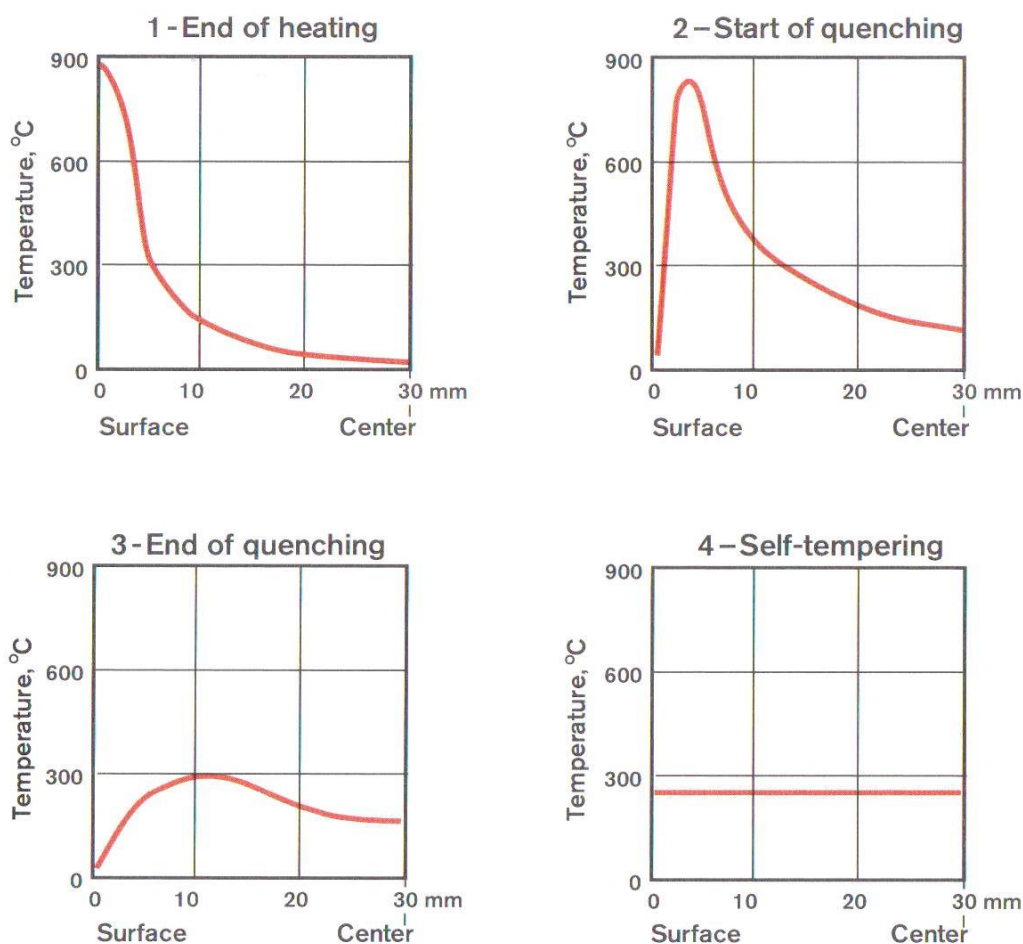
Existují ale také situace, u kterých není možné použít stejné zařízení pro kalení i popouštění. To může nastat v případě, že je požadována menší frekvence, než u kalení. Teploty popouštění jsou pod Curieho bodem a povrchový jev je velmi výrazný. Relativní permeabilita v martenzitickém a feromagnetickém stavu oceli může být u indukčního popouštění až 10krát větší než je tomu u indukčního ohřevu pro kalení, kde se v poslední fázi ohřívá austenitická a paramagnetická struktura, což vede k menší velikosti intenzity magnetického pole. Kvůli tomu je i velikost hloubky vířivých proudů menší. Protože indukční popouštění probíhá mnohem rychleji, než konvenční popouštění v peci, musí být zvýšena teplota popouštění, aby bylo dosaženo stejného snížení tvrdosti. [1, 2]



Obr. 11 Závislost magnetické permeability na teplotě [1]

Poslední možností popouštění je popouštění vnitřním teplem. Tato metoda využívá rozdílné teploty povrchu a jádra. Během kalení je povrch ochlazován rychleji než jádro a po ukončení ochlazování je teplota jádra výrazně vyšší než teplota povrchu. V tuto chvíli začne

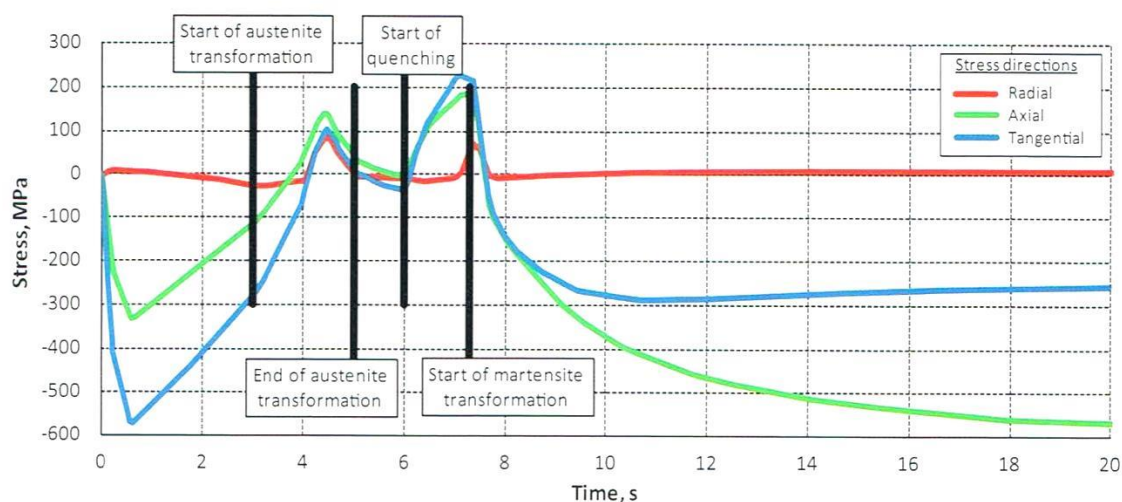
přenos tepla z jádra na povrch. Při správném nastavení kalení je teplota uvnitř materiálu v rozsahu 210-240°C. Popouštění vnitřním teplem je vhodné pro zpracování velkých, jednoduchých a symetrických součástí. U složitých součástí se může teplota jádra lišit v různých částech a popouštění tak bude probíhat v těchto částech odlišně. [1, 2]



Obr. 12 Průběh popouštění vnitřním teplem [2]

2.4 Vnitřní pnutí a trhliny

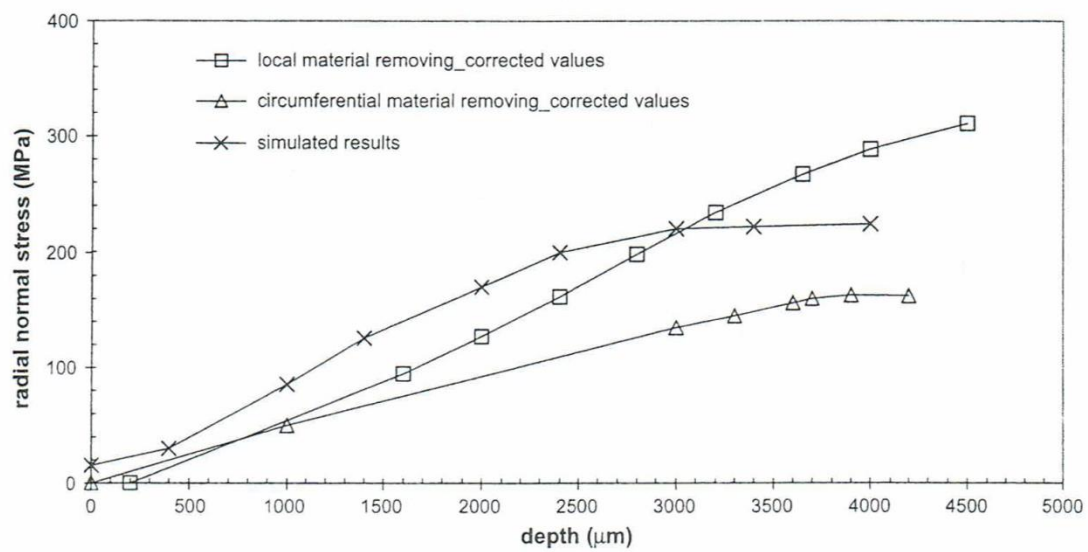
Během kalení dochází k vytvoření vnitřního pnutí. To je způsobeno dvěma druhy napětí a to tepelným namáháním a napětím vzniklým fázovými přeměnami. Tepelné namáhání vzniká velkým tepelným gradientem během rychlého ohřevu a ochlazování během indukčního kalení a způsobuje plastickou deformaci, zejména na povrchu zpracovávaného tělesa. Na velikost vnitřního pnutí má také vliv expanze v povrchové vrstvě vznikající kvůli přeměně austenitu na martenzit, jenž přispívá k tvorbě napětí v tlaku. Plastická deformace v povrchové vrstvě má velký vliv na konečnou velikost vnitřního pnutí. Důležitý vliv na velikost plastické deformace má expanze materiálu, rychlost ohřevu a ochlazování a mez kluzu materiálu v závislosti na teplotě. [2, 9]



Obr. 13 Vnitřní pnutí v průběhu kalení [2]

Ve zpracovávaném materiálu je vždy rovnováha ve vnitřním pnutí. Pokud je v některých místech napětí v tlaku, v dalších místech je napětí v tahu. Napětí v tlaku je na povrchu užitečné. Zajišťuje totiž jistou ochranu proti šíření trhlin. Největší napětí v tahu se většinou vyskytuje pod kalenou vrstvou a tady i začíná vznik podpovrchových trhlin. Vnitřní pnutí lze snížit pomocí popouštění. [2]

Studie uskutečněná ve Francii zkoumala velikost zbytkového pnutí u indukčně kalených vzorků válcového průměru. Bylo provedeno povrchové kalení do hloubky 2 a 3 mm a popouštění na teplotě 180°C po dobu 1,5 hodiny. Rozdělení axiálního a obvodového napětí bylo analyzováno pomocí rentgenové difrakce. Takto zjištěné hodnoty byly porovnány se simulací v programu Flux 2D. Tento program funguje na základě metody konečných prvků. Je schopný řešit spojené magneticko-tepelné osově souměrné nebo rovinné problémy za užití Maxwellových rovnic. Tato metoda dosahuje dobrých výsledků ve srovnání s rentgenovou difrakcí. Největším rozdílem byl výsledek axiálního napětí. To se mohlo stát malou přesností vývoje vlastností materiálu v závislosti na teplotě. Další rozdíly mohla způsobovat zvolená metoda měření, kdy spolehlivost rentgenové difrakce pro experimentální techniku hloubkové analýzy je nejistá. [7, 8]



Obr. 14 Porovnání reálných hodnot se simulací [8]

2.5 Rozdíly mezi indukčním a konvenčním způsobem

Pro ohřev se kromě indukčního způsobu používá více technologií. Ty by se daly rozdělit na základě prostředí, kde samotný ohřev probíhá, na kapalná, plynná a fluidní. [15]

Jako kapalné prostředí se používají roztavené kovy, taveniny solí a hydroxidů a tekuté roztavené strusky. Jejich výhodou jsou výborný přenos tepla, rovnoměrnost ohřevu, ochrana povrchu materiálu proti oxidačním vlivům, atd. K nevýhodám ale patří energetická nevýhodnost provozu, toxicita u některých prostředí a na to navazující problémy s toxickým odpadem. [15]

Jako plynné prostředí se využívá vzduch, aktivní ochranné atmosféry a inertní atmosféry. Vzduch je častým prostředím pro ohřev, ale vliv kyslíku vede ke vzniku okují a k oduhličení. Je proto nutné kyslík z prostředí odstranit nebo použít jiný plyn, jenž vliv kyslíku eliminuje. Aktivní atmosféry obsahují látky, jež mohou reagovat s povrchem, ale udržují se tak, aby neprobíhaly chemické reakce. Většinou se používá směs plynů H_2 , H_2O , CO , CO_2 , CH_4 a N_2 . Volný kyslík je zde v minimálním množství. Aktivní atmosféry se dále dělí na řízené a neřízené. U řízených atmosfér se používá endoplynu jako nosného prvku atmosféry. Mezi neřízené atmosféry patří atmosféry vyráběné nedokonalým spalováním uhlovodíků, endotermické atmosféry z metanu a propanu a atmosféry na bázi štěpeného metanolu. Pro inertní atmosféry se používají dusík, argon nebo helium. Používaný plyn musí mít velmi vysokou čistotu, aby nedošlo k oxidaci. [15]

Posledním typem ohřevu je ohřev v zábalu. Při tomto způsobu nedochází k oxidaci a oduhličení. Pro ohřev v zábalu se používá dřevěné uhlí, koks, třísky z šedé litiny a cementační prášky. [15]

Velikou výhodou indukčního kalení oproti těmto technologiím je možnost selektivního kalení. Mezi další výhody patří rychlost celého procesu, nízká energetická náročnost, nízké provozní náklady a žádné náklady při odstavení linky, dobré pracovní prostředí, menší potřeba čištění po kalení oproti ostatním technologiím (za to může především použití vody nebo směsi vody s polymerem). Další výhodou je možnost povrchového i objemového kalení, nepatrné oduhličení a malá oxidace. [2]

Mezi nevýhody patří vysoké počáteční náklady, omezení ve zpracování geometricky náročnějších součástí, citlivost na změny ve výchozím materiálu, každá nová součást s různým průřezem znamená další náklady na cívky a chladicí hlavice a každá nová součást potřebuje zkušební dobu. [2]

Pro ochlazování po konvenčním způsobu ohřevu se většinou používá klasického ponorného způsobu. Po vložení tělesa ohřátého na austenitizační teplotu se vytvoří kolem tělesa plynová vrstva. Ta vzniká kvůli varu prostředí a nedostatečnému uvolňování a kondenzování bublin. Tato plynová vrstva zabraňuje přestupu tepla, a proto se sníží rychlost ochlazování. Celistvost plynové vrstvy rozrušuje imploze bublin, díky nimž na jejich místa proudí kapalina. Tímto bublinovým varem se razantně zvyšuje rychlost ochlazování. S dalším snižováním teploty tělesa přestává vznik bublin a dochází k ochlazování pouze prouděním. V případě použití vody s příměsí polymeru se na tělese utvoří silná vrstva, která izoluje povrch. Tím se zpomalí ochlazování. Dále dojde k rovnoměrnějšímu ochlazování. [15]

Pro ochlazování u indukční zušlechťovací linky se používá vodní sprcha (popřípadě sprcha vody s příměsí polymerů). Při použití sprchy k vytvoření plynové vrstvy nedochází,

ochlazování probíhá díky implozi bublin a rychlost ochlazování se rapidně zvýší. Další výhodou je rovnoměrné ochlazování na celém povrchu součásti. [15]

3. Cíle práce

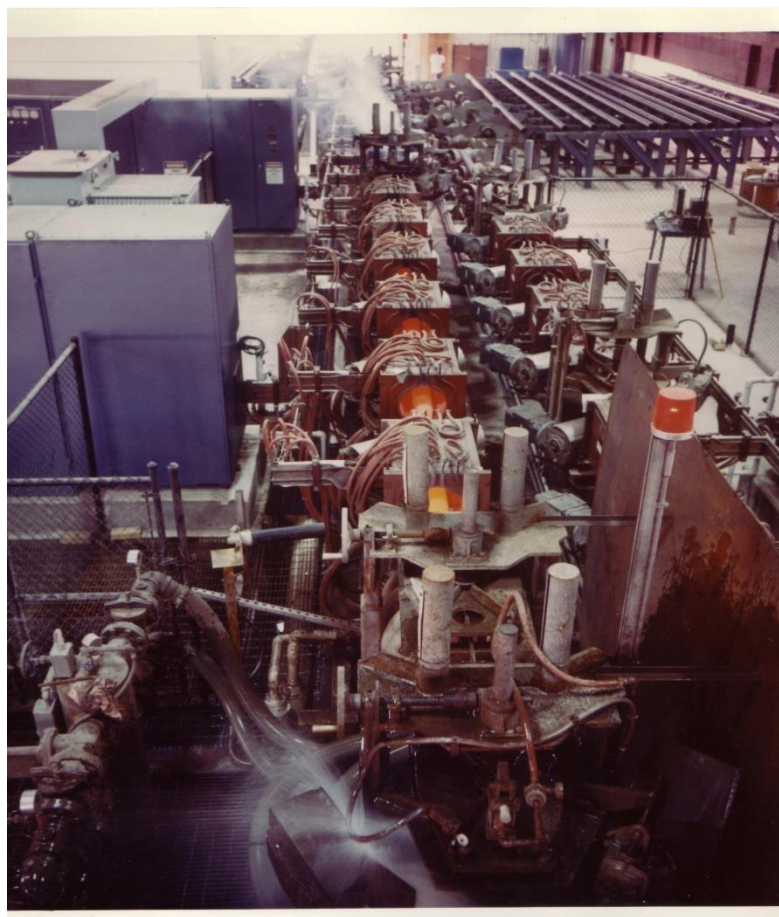
Hlavním cílem práce je vypracování literární rešerše na téma indukčního ohřevu a kalení a jeho porovnání se standartním ohřevem a ponorným způsobem zušlechťování. Dále se bude student zabývat možnostmi simulace tepelného zpracování na indukčních zušlechťovacích linkách v programu QTSteel a simulací vzorových značek ocelí.

4. Experimentální část

Experimentální část zahrnuje provedení a výsledky simulace teplotních polí, struktur a výsledných vlastností a jejich porovnání s převzatými výsledky zušlechťování klasickým způsobem v peci.

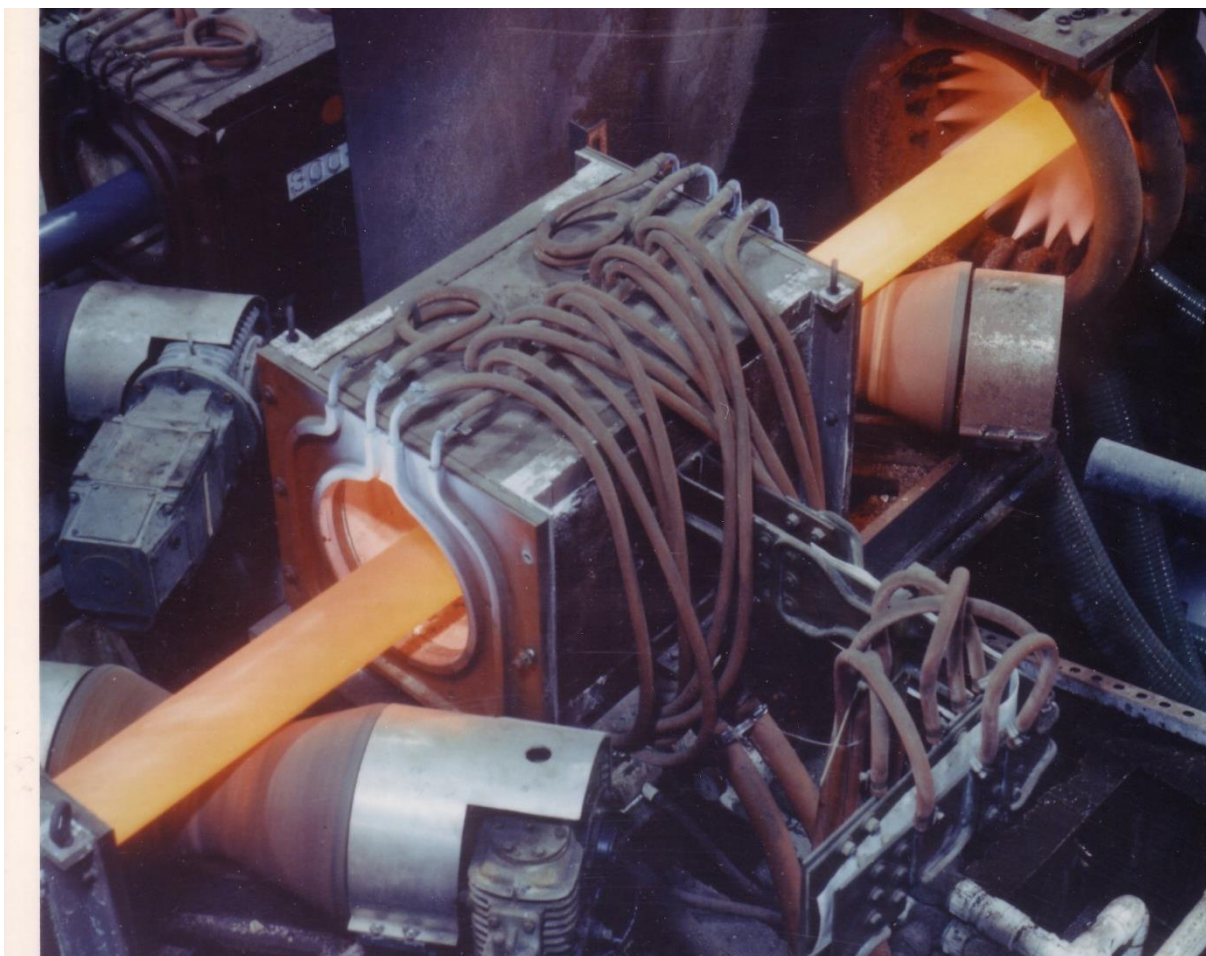
4.1 Zušlechťovací linka v Třineckých železárnách, a.s.

V Třineckých železárnách, a.s. (dále TŽ) bude vybudována zušlechťovací linka pro zpracování tyčové oceli o průměru od 16 do 80 mm a s maximální délkou 10,5 m. Tyčová kruhová ocel určená pro zušlechťování na této lince je válcována na kontijemné trati v Třinci z kontinuálně litých sochorů o kvadrátu 150 mm.



Obr. 15 Příklad zušlechťovací linky [14]

Pro kalení i popouštění se bude používat indukčního způsobu zušlechťování. Pro ohřev na kalící teplotu bude použito 20 induktorů. Celkově budou použity tři sady cívek a to pro průměr od 16 do 30 mm, od 30 do 50 mm a nad 50 mm. Pro první sadu cívek se bude používat frekvence 8 kHz, pro druhou 3,5 kHz a pro třetí 1,5 kHz. Pro kalení budou použity dvě kalící hlavy. Ty mají velikost 200 mm a mezera mezi nimi bude 300 mm.



Obr. 16 Příklad induktoru [14]

Délka kalící sekce je 9 m. Pro tři druhy rozměrů budou opět připraveny tři sady kalicích hlav. Jako kalicí prostředí se bude používat voda. Jako jedna z dalších možností se uvažovala i voda s příměsí 5% polymeru, proto se pro toto prostředí provádí i simulace. Byl uvažován Polyquench VP85KB firmy Burgdorf. Je to polyvinylpirolidonový koncentrát. Pro ohřev na popouštěcí teplotu se bude používat celkem 42 induktorů. Pro ohřev bude využito 14 z nich a pro výdrž na popouštěcí teplotě bude využito 28 induktorů. Pro popouštění je připravena pouze jedna sada induktorů pro všechny průměry. Za induktory pro ohřev a výdrž jsou opět dvě ochlazovací hlavice, taktéž společné pro všechny průměry. Taktéž je možné popouštění na vzduchu, bez využití ochlazovacích hlavice. Délka popouštěcí sekce je 18,5 m. Celková délka linky je tedy 27,5 m. Příklady linky a používaných induktorů je možné vidět na obr. 15, obr. 16 a dále v příloze. Výrobce linky udává pro ocel 42CrMo4 při ohřevu z 20°C na 900°C následující maximální výkonost pro kalení:

Tab. 1: Maximální výkonost kalící linky

Průměr induktoru [mm]	Průměr tyče [mm]	Výkon za hodinu [kg/h]	Kalící teplota [°C]
80	80	3000	900
F=1,5 kHz	70	3000	900
	60	3000	900
50	50	3000	900
F=3,5 kHz	40	3000	900
	34	3000	900
30	30	3000	900
F = 8 kHz	25	3000	900
	20	2800	900
	16	1450	900

Pro popouštění udává výrobce při ohřevu z 20°C na 700°C tyto maximální výkony:

Tab. 2: Maximální výkonnost linky pro popouštění

Průměr induktoru [mm]	Průměr tyče [mm]	Výkon za hodinu [kg/h]	Popouštěcí teplota [°C]
80	80	3000	700
F=0,8 kHz	70	3000	700
	60	3000	700
	50	3000	700
	40	3000	700
	34	3000	700
	30	3000	700
	25	3000	700
	20	2800	700
	16	1450	700

Měření teploty bude probíhat pomocí optických pyrometrů, které budou umístěny za ohřevem na kalící teplotu, za kalící sekci, za ohřevem na popouštěcí teplotu, na konci celé popouštěcí sekce a za ochlazováním po pouštění (jen informativní údaj, nebude používán k regulaci linky).

4.2 Simulace v programu QTSteel

QTSteel je program firmy ITA, spol. s r.o. a je určen pro simulaci kalení a popouštění uhlíkových a legovaných ocelí. Program je možno použít pro oceli s obsahem uhlíku od 0,06% do 0,6% a s obsahem legovaných prvků do 10%. Pro uhlíkové a nástrojové oceli je možné zadat chemické složení v tomto rozsahu:

Tab. 3: Rozsah zadávání chemického složení pro uhlíkové oceli

C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
0,060-0,600	0,300-2,000	0,100-1,500	0,000-6,000	0,000-5,000	0,000-3,500

V	W	Ti	Nb	Al	N
0,000-0,400	0,000-0,700	0,000-0,150	0,000-0,100	0,000-0,050	0,000-0,020

B	Cu	Sn	S	P
0,000-0,004	0,000-0,500	0,000-0,020	0,000-0,060	0,000-0,065

Pro nástrojové oceli je možné zadat chemické složení v tomto rozsahu:

Tab. 4: Rozsah zadávání chemického složení pro nástrojové oceli

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,600-1,200	0,300-2,000	0,100-1,500	0,000-2,000	0,000-2,000

Mo	V	W	Ti	Nb
0,000-0,700	0,000-0,700	0,000-1,000	0,000-0,050	0,000-0,050

Al	N	B	Cu
0,000-0,050	0,000-0,020	0,000-0,002	0,000-0,500

Tyto možnosti nabízí základní verze programu. Je ale také možné program rozšířit pro jiné chemické složení.

Program obsahuje možnost modelování pro různé profily, konkrétně ve verzi pro TŽ je to obdélníková tyč, válec, kruhová tyč, prstenec, trubka, kolejnice 60E1, kolejnice 60E2 a kolejnice 136RE.

Na základě vstupních dat (např. chemické složení, teplota a čas austenitizace, podmínky kalení a popouštění) lze získat podíly strukturních složek a mechanické vlastnosti oceli.

Jako kalicí prostředí lze zadat nízkokonzentrovaný polymer (5% Aquatensid ve vodě, sprcha), vysokokonzentrovaný polymer (12% Aquatensid, sprcha), rychlý olej (Belliniho olej při teplotě 70°C v lázni bez míchání), pomalý olej (Iloquench 5 při teplotě 70°C v lázni bez míchání), Hot Quenching olej (Marquench 722 při teplotě 110°C v lázni bez míchání), pomalý polymer (15% FerroQuench, 30°C v lázni, 0,4m.s⁻¹), rychlý polymer (10% Aquatensid BW/RB při teplotě 30°C v lázni, 0,4m.s⁻¹), sůl (AS140 Durferrit při teplotě 190°C v lázni bez míchání, voda 30°C (lázeň bez míchání), voda 70°C (lázeň bez míchání). Program dále nabízí úpravu těchto režimů i tvorbu nových.

Pro účely bakalářské práce se prováděly výpočty pro ocel 42CrMo6 dle normy ČSN EN 10083-3. Tato ocel je určena k zušlechťování a dle normy má toto chemické složení:

Tab. 5: Rozsah chemického složení dle normy

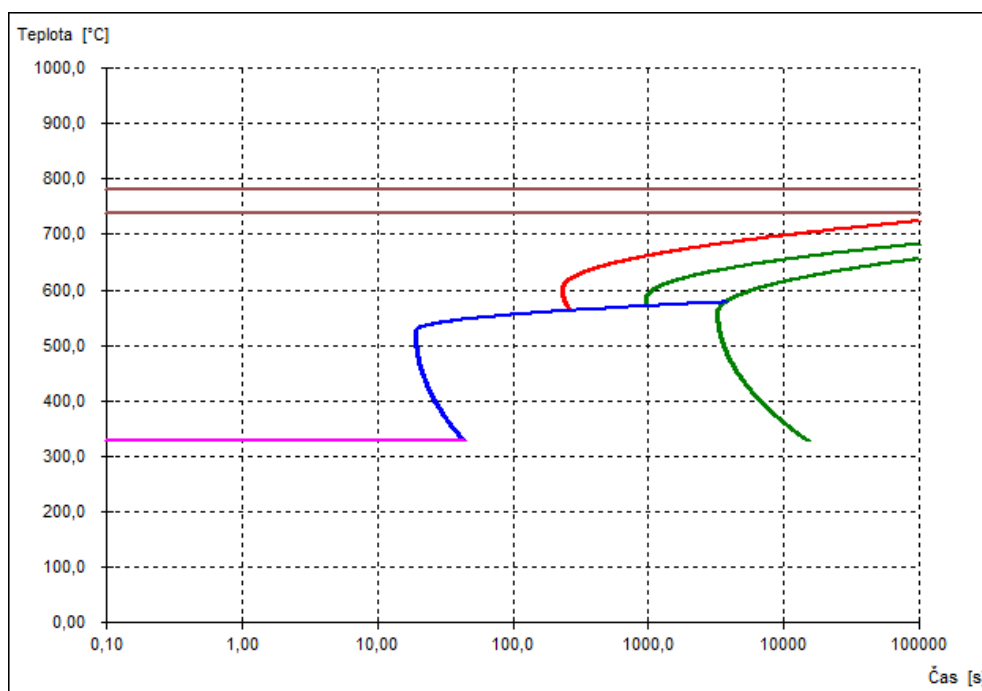
	C	Si max	Mn	P max	S max	Cr	Mo
42CrMo4	0,38 - 0,45	0,40	0,60 - 0,90	0,035	0,03	0,90 - 1,20	0,15 - 0,30

V programu QTSteel se počítalo konkrétně s tímto chemickým složením:

Tab. 6: Použité chemické složení

	C	Si	Mn	Al	Ni	Cr	Mo
42CrMo4	0,420	0,280	0,800	0,025	0,100	1,000	0,190

Po zadání chemického složení program automaticky vykreslí křivky ARA:



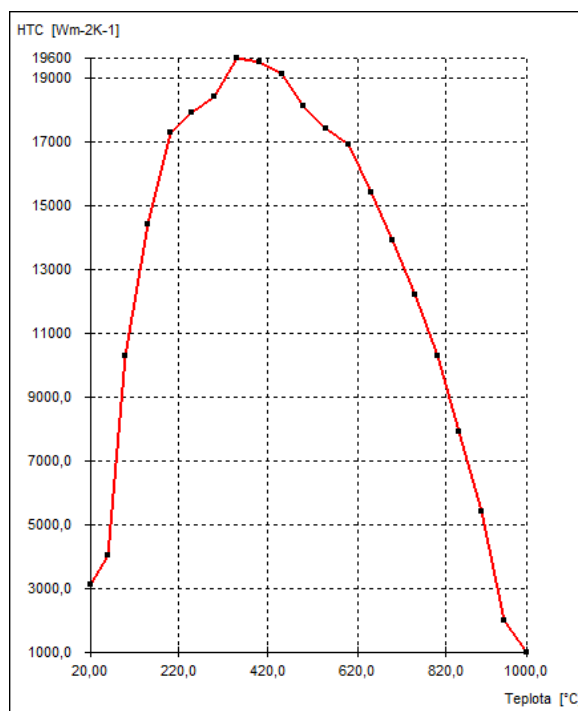
Obr. 17 ARA diagram pro zadané chemické složení

Požadované mechanické vlastnosti jsou v normě dány takto:

Tab. 7: Požadované mechanické vlastnosti dle normy

Rozměr	Re	Rm	A5	Z	KV	KCU3	HB
nad do	min		min	min	min	min	
mm	MPa	MPa	%	%	J	J/cm ²	inf
0 - 16	900	1100-1300	10	40	30	50	337-393
16 - 40	750	1000-1200	11	45	35	60	307-363
40 - 100	650	900-1100	12	50	35	60	275-337
100 - 160	550	800-950	13	50	35	60	244-292
160 - 250	500	750-900	14	55	35	60	228-275

Výpočty byly prováděny pro tyče s průměrem 80 mm, 40 mm a 20 mm. Pro každý rozměr byly zkoušeny různé alternativy v rychlosti posuvu a na tom závislé délce kalení a popouštění. Maximální rychlost posuvu se počítala z výkonosti pece za hodinu (jak uvádí tab. 1) a přepočtem přes metrovou hmotnost tyče. Nominální délka tyče je 6 m. Výpočet se provedl pro každý průměr. Jako kalicí prostředí se používala voda a voda s příměsí 5% polymeru (Aquatensid).



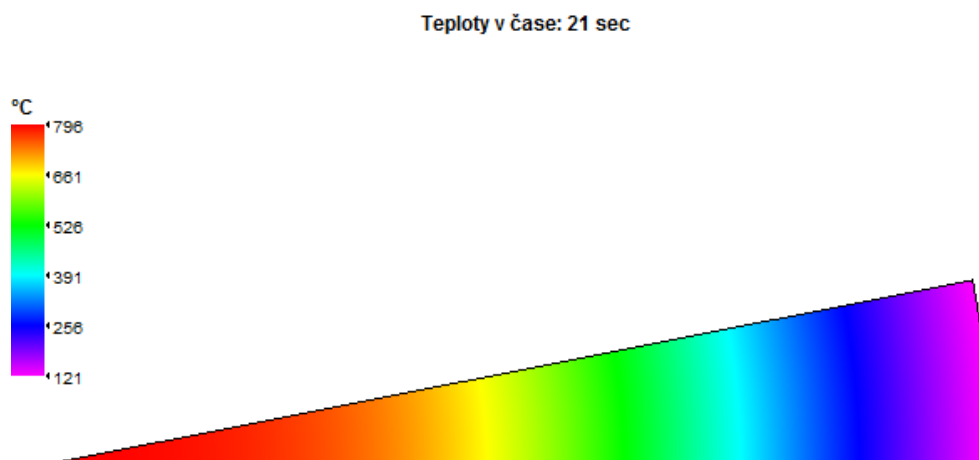
Obr. 18 Závislost součinitele přestupu tepla na teplotě pro nízkokoncentrovaný polymer

Byla provedena řada simulací za účelem dosažení požadovaných mechanických vlastností. Při zvolení maximální možné rychlosti posuvu (dána parametry kalicí linky) zůstala po kalení teplota jádra vysoká (např. pro průměr 80 mm byla teplota jádra 796°C – viz

kapitola 4.2.1) a nedošlo k transformaci austenitu na martenzit. Proto bylo potřeba nutno najít kompromis mezi maximální rychlostí posuvu a požadovanými mechanickými vlastnostmi. V kapitolách 4.2.2 a 4.2.3 jsou již uvedené údaje pro optimální režimy u nichž jsou dosaženy mechanické vlastnosti vyhovující.

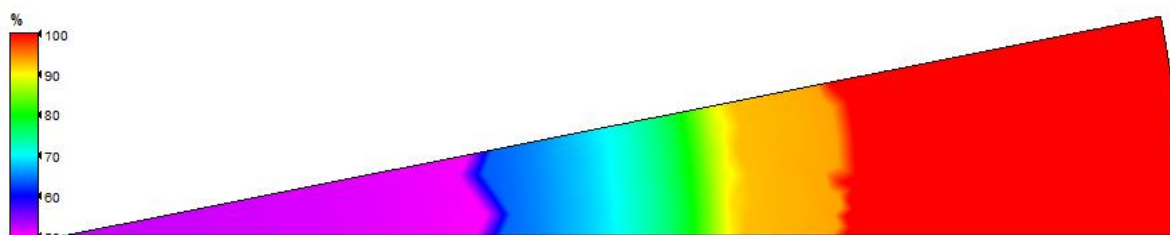
4.2.1 Kruhové tyče s průměrem 80 mm

Pro tyče s průměrem 80 mm je kalicí teplota 850°C a popouštěcí teplota 610°C. Maximální rychlost posuvu linky je 0,033 m.s⁻¹. Při této rychlosti je sekvenční kalení pouhých 21 vteřin a teplota jádra je příliš vysoká - 796°C. Teplota v celém průřezu vypadá takto:

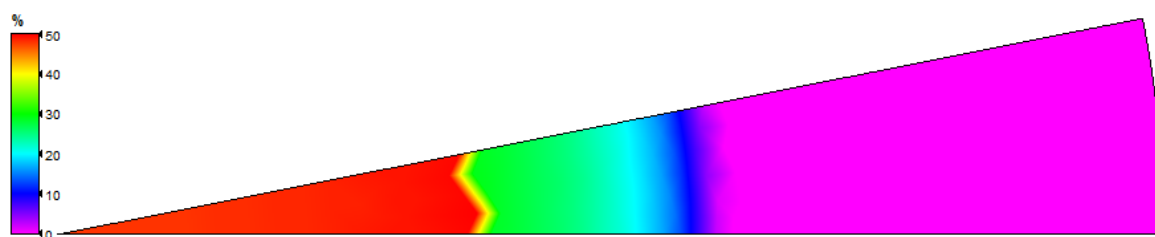


Obr. 19 Teploty v průřezu po kalení pro rychlost posuvu linky 0,033 m.s⁻¹.

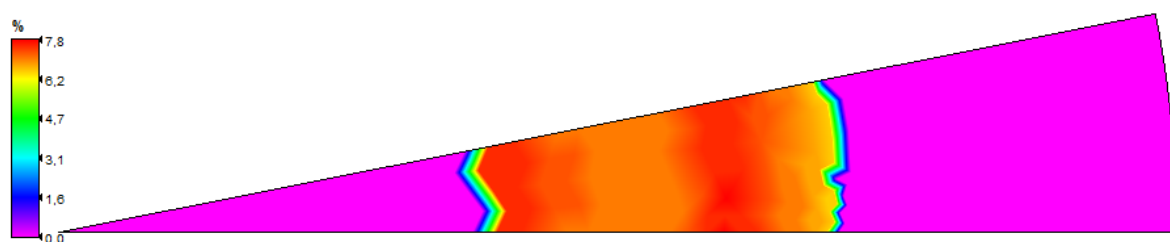
Jako optimální pro průměr tyče 80 mm byla pomocí simulací určena rychlost posuvu 0,008 m.s⁻¹. Při této rychlosti by se mělo dosáhnout požadovaných mechanických vlastností. Doba ohřevu je v tomto případě 18 minut a ochlazování trvá 85 vteřin. Ohřev na popouštěcí teplotu trvá 12,5 minut, výdrž na popouštěcí teplotě je 25 minut. Celková doba průchodu linkou je přibližně 57 minut. Po kalení byla struktura tvořena z martenzitu (obr. 20), bainitu (obr. 21) a zbytkového austenitu (obr. 22).



Obr. 20 Strukturní podíl martenzitu v průřezu

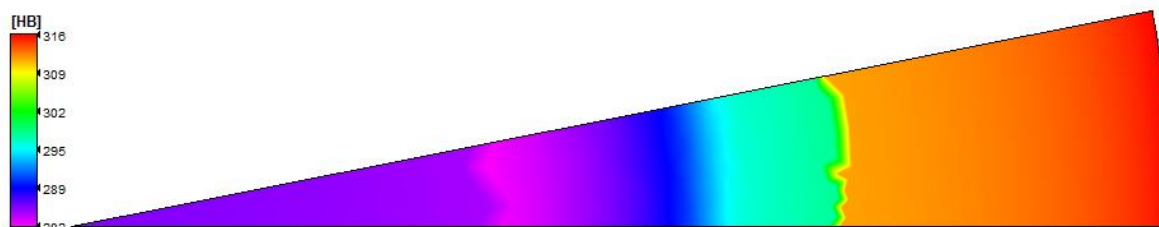


Obr. 21 Strukturní podíl bainitu v průřezu při optimálním režimu



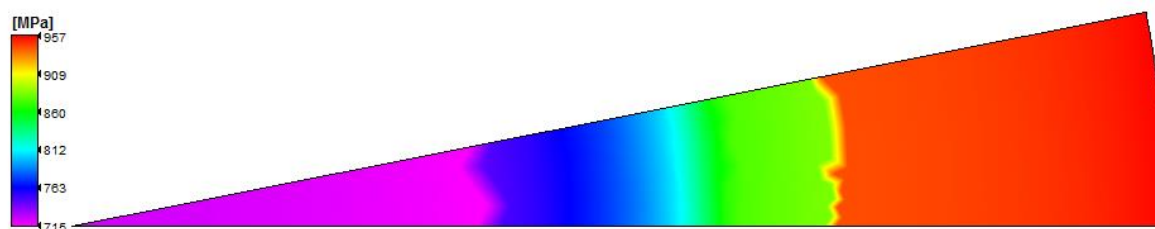
Obr. 22 Strukturní podíl zbytkového austenitu v průřezu při optimálním režimu

Výsledná tvrdost je v rozmezí od 282 do 316 HB. Norma stanovuje tvrdost od 275 do 337 HB.

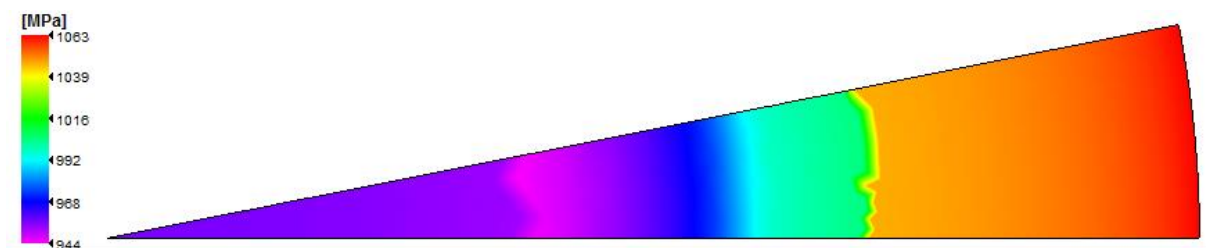


Obr. 23 Tvrdost v průřezu po popouštění pro průměr 80 mm při optimálním režimu

Minimální mez kluzu je dle normy 650 MPa. Minimální mez kluzu podle programu je 715 MPa. Mez pevnosti vypočítaná programem je v rozmezí 944-1063 MPa. Norma udává mez pevnosti v rozmezí 900 až 1100 MPa.



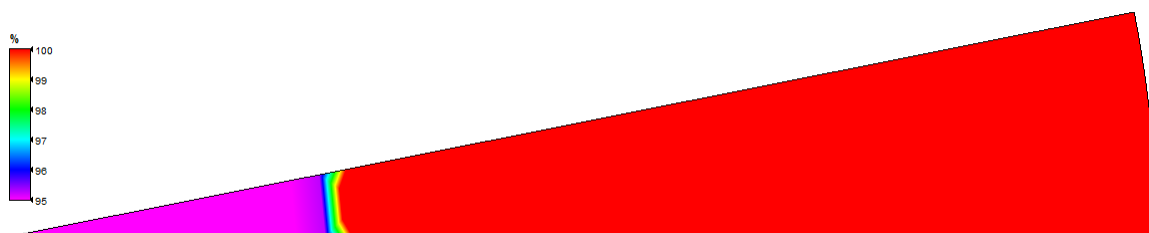
Obr. 24 Mez kluzu v průřezu po popouštění pro průměr 80 mm při optimálním režimu



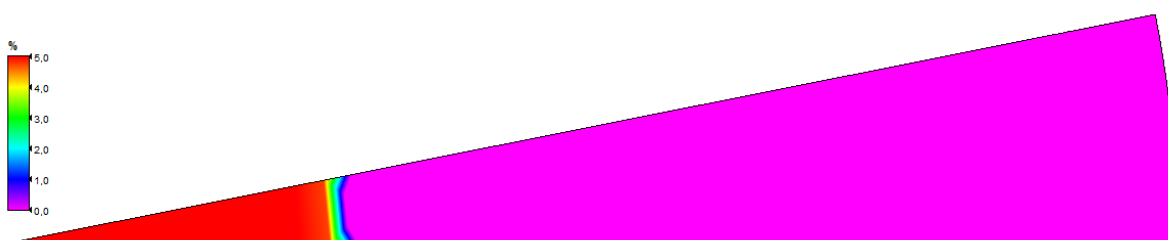
Obr. 25 Mez pevnosti v průřezu po popouštění pro průměr 80 mm při optimálním režimu

4.2.2 Kruhové tyče s průměrem 40 mm

Pro tyče s průměrem 40 mm je kalící teplota 870°C a ohřev na tuto teplotu trvá 7,5 minuty. Ochlazování trvá 35 sekund. Popouštěcí teplota je 610°C. Ohřev na popouštěcí teplotu trvá 5,1 minuty a výdrž trvá 10,3 minuty. Rychlost posuvu je 0,02 m.s⁻¹. Celková doba průchodu je 23 minut. Struktura je tvořena z martenzitu (obr. 26) a zbytkového austenitu (obr. 27).

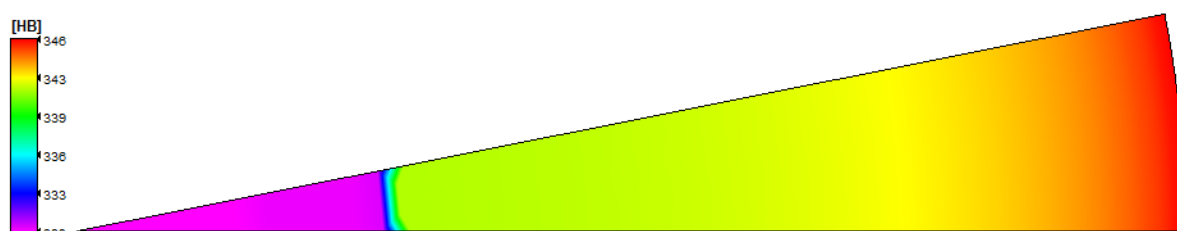


Obr. 26 Strukturní podíl martenzitu v průřezu při optimálním režimu



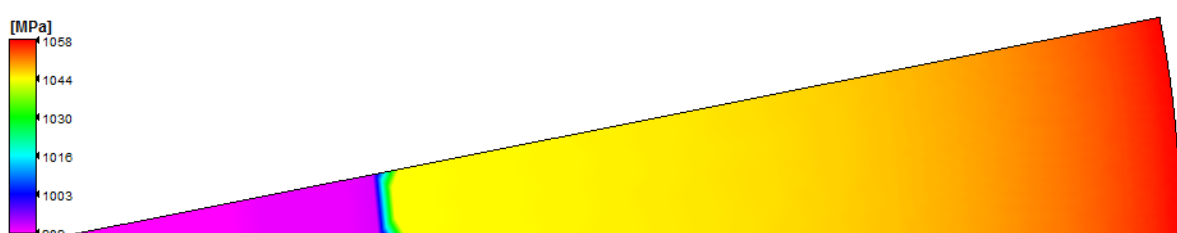
Obr. 27 Strukturní podíl zbytkového austenitu v průřezu při optimálním režimu

Vypočítaná tvrdost se pohybuje v rozmezí od 330 do 346 HB.

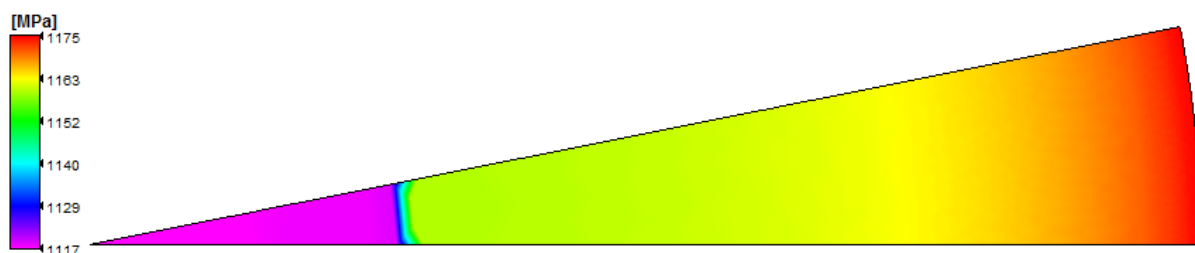


Obr. 28 Tvrdost v průřezu pro průměr 40 mm při optimálním režimu

Minimální mez kluzu je 989 MPa. Mez pevnosti je v rozsahu od 1117 do 1175 MPa.



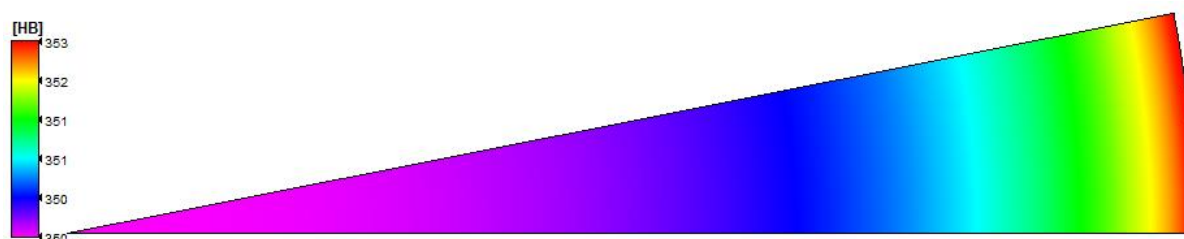
Obr. 29 Mez kluzu v průřezu pro průměr 40 mm při optimálním režimu



Obr. 30 Mez pevnosti pro průměr 40 mm při optimálním režimu

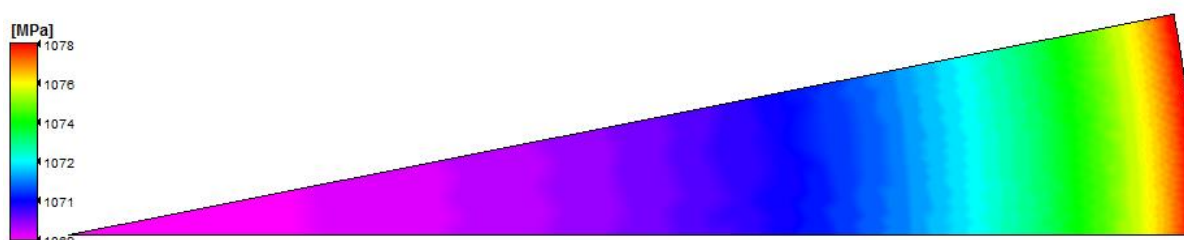
4.2.3 Kruhové tyče s průměrem 20 mm

Pro tyče s průměrem 20 mm byla jako optimální určena rychlost posuvu $0,035 \text{ m.s}^{-1}$. Kalicí teplota je 870°C a ohřev na kalicí teplotu trvá 4,3 minuty. Ochlazovací sekvence trvá 20 sekund. Po kalení je struktura tvořena pouze martenzitem. Popouštěcí teplota je 570°C , ohřev na tuto teplotu trvá 2,9 minuty a výdrž na popouštěcí teplotě je 8,8 minuty. Celková doba průchodu linkou je přibližně 13 minut. Tvrdost vypočítaná programem je v rozmezí od 359 do 362 HB.

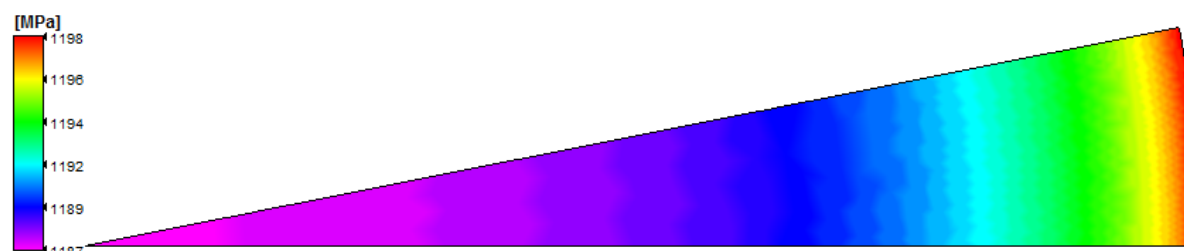


Obr. 31 Tvrdost v průřezu pro průměr 20 mm při optimálním režimu

Minimální mez kluzu byla 1069 MPa. Mez pevnosti se pohybovala v rozmezí od 1187 do 1198 MPa.



Obr. 32 Mez pevnosti v průřezu pro průměr 20 mm při optimálním režimu



Obr. 33 Mez pevnosti v průřezu pro průměr 20 mm při optimálním režimu

4.2.4 Porovnání s konvenčním způsobem

Na závěr bylo provedeno porovnání hodnot vypočítaných programem QTSteel s hodnotami dosahovanými pro tento materiál konvenčním způsobem tepelného zpracování v Sochorové Válcovně TŽ a.s. (SCHV). Tento výrobní závod je umístěn v Kladně. Tepelné zpracování zde probíhá na třech zušlechťovacích a dvou žíhacích linkách. Podmínky pro kalení můžeme vidět v tabulce:

Tab. 7: Kalicí podmínky v SCHV

Rozměr	Kalicí teplota	Ochlazovací prostředí
mm	°C	
do 30	860	Polymer
30 - 50	870 - 880	Polymer
50 - 80	840 - 890	Voda

Popouštěcí teplota se stanovuje na základě požadovaných vlastností v rozmezí od 500 do 650°C. Jako ochlazovací prostředí pro popouštění se používá voda.

Porovnání hodnot reálně získané konvenčním způsobem a vypočítaných hodnot v programu QTSteel můžeme vidět v této tabulce:

Tab. 8: Porovnání mechanických vlastností

Rozměr	Mez pevnosti (QTSteel)	Tvrdost (QTSteel)	Mez pevnosti (SCHV)	Tvrdost (SCHV)	Mechanické vlastnosti - rozdíl	
Průměr [mm]	MPa	HB	MPa	HB	Mez pevnosti	Tvrdost
20	1187 - 1198	350 - 353	1050 - 1150	323 - 350	4 - 13%	0,9 - 8,4 %
40	1046 - 1098	327 - 342	1050 - 1150	323 - 350	0,4 - 4,7%	1,2 - 2,3 %
80	944 - 1063	282 - 316	950 - 1050	292 - 323	0,6 - 1,2%	2,2 - 3,5 %

4.3 Porovnání trubek

Dále bylo v experimentální části provedeno porovnání simulace tepelného zpracování trubek s reálnými hodnotami. Trubky byly válcovány a tepelně zpracovány ve válcovně trub ve Vítkovicích, která je provozem Třineckých železáren, a.s. Vstupním materiálem jsou kruhové kontislitky. Trubky se zpracovávají na válcovací trati s Mannesmannovou technologií.

Porovnání se provádělo pro trubky z oceli 20MnV6 a 42CrMo4. Pro výpočty se používalo reálné chemické složení, které bylo v dané tavbě. Při výpočtu byly nasimulovány hodnoty mechanických vlastností po celém průřezu, v dalším textu jsou uvedeny jejich minimální a maximální hodnoty.

4.3.1 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 203 mm

Trubky z oceli 20MnV6 s vnějším průměrem 203 mm a tloušťkou stěny 30 mm měly toto chemické složení:

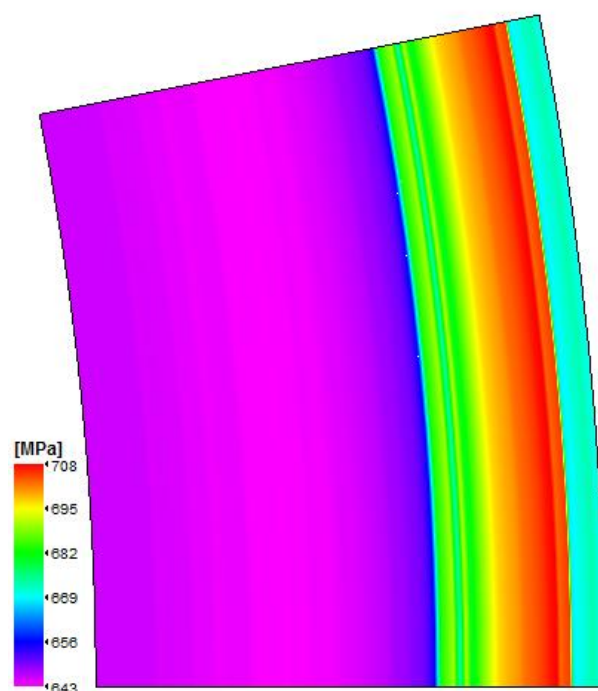
Tab. 9: Chemické složení pro průměr 203 mm

C	MN	SI	P	S	CU	CR	NI	AL	MO
0,1860	1,4600	0,3420	0,0180	0,0060	0,0400	0,2300	0,0200	0,0320	0,0040

CO	V	TI	AS	SN	B	CA	H	N	NB
0,0040	0,1340	0,0021	0,0030	0,0040	0,0004	0,0020	1,2000	0,0108	0,0030

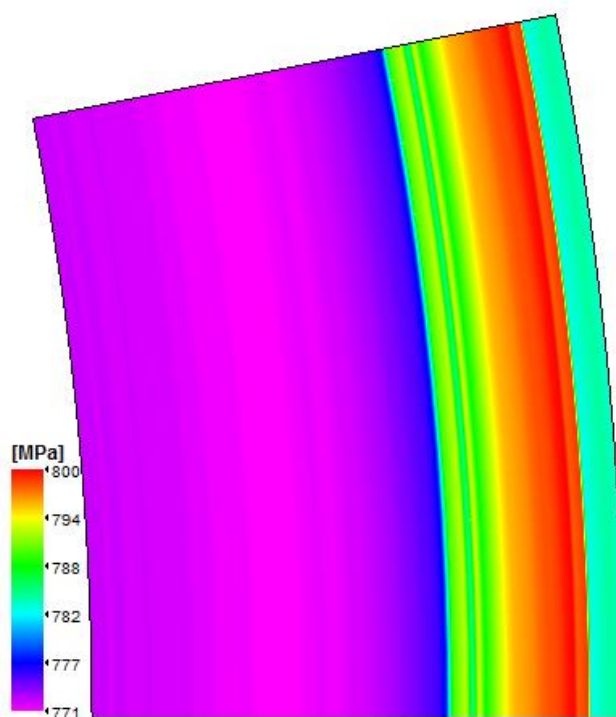
ZR	SB	PB	W	ZN
0,0030	0,0010	0,0008	0,0100	0,0020

Austenitizační teplota byla 920°C a čas austenitizace 37,5 minuty. Čas ochlazování byl 75 sekund a jako kalící prostředí byla používána voda. Po kalení proběhlo popouštění na teplotu 630°C s výdrží 20 minut na popouštěcí teplotě. Ochlazování po popouštění bylo na vzduchu. Naměřená mez kluzu byla v rozmezí od 628 do 702 MPa a vypočítaná mez kluzu od 643 do 708 MPa. Hodnoty vypočítané programem jsou tedy o 0,9 – 2,4 % vyšší.



Obr. 34 Mez kluzu v průřezu

Mez pevnosti vyšla dle programu 771 – 800 MPa a naměřená mez pevnosti 754 – 797 MPa. Rozdíl je tedy 0,4 – 2,3 %.



Obr. 35 Mez pevnosti v průřezu

4.3.2 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 355,6 mm

Trubky z 20MnV6 s vnějším průměrem 355,6 mm a tloušťkou stěny 48 mm měly toto chemické složení:

Tab. 10: Chemické složení pro průměr 355,6 mm

C	MN	SI	P	S	CU	CR	NI	AL	MO
0,1830	1,4500	0,3290	0,0170	0,0050	0,0500	0,2200	0,0300	0,0360	0,0070

CO	V	TI	AS	SN	B	CA	H	N	NB
0,0040	0,1410	0,0018	0,0030	0,0050	0,0004	0,0017	1,9000	0,0120	0,0030

ZR	SB	PB	W	ZN
0,0030	0,0020	0,0005	0,0100	0,0020

Teplota austenitizace byla opět 920°C, čas austenitizace byl 42,5 minuty. Jako kalicí prostředí byla opět použita voda po dobu 85 sekund. Popouštěcí teplota byla 620°C a výdrž na této teplotě 30 minut. Ochlazování po pouštění proběhlo opět na vzduchu. Reálně naměřená mez kluzu byla v rozmezí od 684 do 714 MPa, vypočítaná poté byla v rozsahu od 624 do 732 MPa. Vypočítané hodnoty jsou tedy o 2,5 – 9,6 % vyšší. Naměřená mez pevnosti byla od 789 do 805 MPa. Vypočítaná mez pevnosti byla od 762 do 812 MPa. Hodnoty podle programu jsou o 0,9 – 3,5 % vyšší.

4.3.3 Trubky z oceli 20MnV6 s průměrem 193,7 mm

Poslední zkoumaným průměrem pro ocel 20MnV6 je vnější průměr 193,7 mm s tloušťkou stěny 22,2 mm. Chemické složení bylo následující:

Tab. 11: Chemické složení pro průměr 193,7 mm

C	MN	SI	P	S	CU	CR	NI	AL	MO
0,1860	1,4600	0,3420	0,0180	0,0060	0,0400	0,2300	0,0200	0,0320	0,0040

CO	V	TI	AS	SN	B	CA	H	N	NB
0,0040	0,1340	0,0021	0,0030	0,0040	0,0004	0,0020	1,2000	0,0108	0,0030

ZR	SB	PB	W	ZN
0,0030	0,0010	0,0008	0,0100	0,0020

Austenitizační teplota byla 940°C a čas austenitizace 35 minut. Jako kalicí prostředí byla použita voda a doba ochlazování byla 70 sekund. Po kalení proběhlo popouštění na teplotu 630°C, výdrž na popouštěcí teplotě byla 20 minut. Ochlazování po pouštění bylo na vzduchu. Vypočtená mez kluzu byla v rozmezí od 651 do 730 MPa a naměřená hodnota byla 609 – 670 MPa. Vypočítané hodnoty jsou o 5,5 - 6,9% vyšší. Vypočítaná mez pevnosti se pohybovala v rozmezí od 776 do 811 MPa, naproti tomu naměřená mez pevnosti byla v rozsahu od 733 do 770 MPa. Rozdíl tedy činí 5,3 -5,9 %.

4.3.4 Trubky z oceli 42CrMo4 s průměrem 203 mm

Pro trubky z ocele 42CrMo4 se prováděly výpočty pro průměr 203 mm a 244,5 mm. U trubek s průměrem 203 mm byla tloušťka stěny 32 mm. Chemické složení pro tento průměr bylo následující:

Tab. 12: Chemické složení pro průměr 203 mm

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Mo
0,4330	0,7800	0,2760	0,0130	0,0120	0,0300	1,1200	0,0600	0,0240	0,2170

Co	V	Ti	As	Sn	B	Ca	H
0,0040	0,0070	0,0015	0,0030	0,0060	0,0003	0,0006	1,4000

Austenitizační teplota byla 850°C a čas austenitizace byl 42,5 minuty. Jako kalicí prostředí byla použita voda a kalicí sekvence trvala 85 sekund. Popouštělo se na teplotu 640°C a výdrž na popouštěcí teplotě byla 50 minut. Ochlazování trubek proběhlo v mlze (směs vody se vzduchem). Minimální vypočítaná mez kluzu byla v rozsahu 933 MPa a naměřená byla 867 MPa. Vypočítané hodnoty jsou o 7,6 % vyšší. Mez pevnosti vyšla podle programu 933 až 941 MPa, naměřená mez pevnosti byla 975 MPa, což je rozdíl vyšší přibližně o 7 %.

4.3.5 Trubky z oceli 42CrMo4 s průměrem 244,5 mm

U trubek s průměrem 244,5 mm byla tloušťka stěny 12,5 mm a měly toto chemické složení:

Tab. 13: Chemické složení pro průměr 244,5 mm

C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	Mo
0,4410	0,8500	0,3550	0,0130	0,0120	0,0500	1,1900	0,0400	0,0280	0,2860

Co	V	Ti	As	SN	B	Ca	H
0,0050	0,0070	0,0018	0,0020	0,0050	0,0003	0,0008	1,8000

Teplota austenitizace byla 850°C a doba austenitizace 20 minut. Jako kalicí prostředí byla použita voda, doba ochlazování byla 40 sekund. Popouštělo se na teplotu 640°C a výdrž na této teplotě byla 30 minut. Ochlazování po pouštění bylo opět v mlze. Mez kluzu vypočítaná programem byla 991 – 996 MPa a naměřená 867 – 935 MPa, což činí rozdíl mezi výpočtem a skutečností 6,5 – 14,3 %. Vypočítaná mez pevnosti byla 1100 – 1106 MPa, naproti tomu skutečná mez pevnosti byla 1001 – 1034 MPa, což jsou hodnoty o 7 – 10 % nižší.

5. Diskuze výsledků

Pro získání požadovaných vlastností tyčové oceli na indukční zušlechťovací lince byla provedena řada simulací pro ocel 42CrMo6 dle normy ČSN EN 10083-3. Vycházelo se z maximální výkonnosti linky. Při nejvyšší možné rychlosti posuvu ale nedošlo k požadovanému ochlazení a tedy ani k transformaci austenitu na martenzit (platí zejména pro větší průměry). Proto bylo potřeba najít pro každý průměr tyče vhodnou rychlost posuvu, při které se dosáhne nejvyššího výkonu při zachování požadovaných mechanických vlastností. Optimální dosažené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 14.

Tab. 14: Přehled výsledků

	Kalení					Popouštění		Celková doba zpracování
průměr	rychlost posuvu	kalicí teplota	doba ohřevu	ochlaz. sekvence	popouštěcí teplota	ohřev	výdrž	
mm	m.s ⁻¹	°C	min.	sec.	°C	min.	min.	min.
20	0,035	870	4,3	20	570	2,9	8,8	16
40	0,02	870	7,5	35	610	5,1	10,3	23
80	0,008	850	18	85	610	12,5	25	56

Jelikož indukční zušlechťovací linka v Třinci je teprve ve výstavbě nebylo možné porovnat nasimulované výsledky se skutečností. Bylo ale možné porovnat tyto nasimulované výsledky s konvenčním způsobem zpracování v SCHV. Dosahované meze pevnosti a tvrdosti dobře korespondují s nasimulovanými hodnotami (viz tab. 8). Pouze u průměru 20 mm je odchylka meze pevnosti vyšší než 10%.

Rovněž proběhlo srovnání mechanických vlastností trubek nasimulovaných programem s reálnými hodnotami s cílem zjistit přesnost programu. Tvůrce programu garantuje přesnost do 10%. Při porovnání rozdílů hodnot dojdeme k závěru, že většina výsledků vyhovuje dané přesnosti. Nejpresnější výsledky byly vypočítány pro ocel 20MnV6. U oceli 42CrMo4 byly rozdíly větší, ale až na jednu hodnotu pro průměr 244,5 mm byly rozdíly menší než daných 10%.

Z výpočtů rovněž vyplývá, že na vnějším povrchu trubek je dosahováno pro obě značky oceli a všechny průměry vyšší hodnoty meze pevnosti, meze kluzu a tvrdosti, než na vnitřním povrchu. Porovnání je znázorněno v tabulce 15, kde pro hodnoty vypočítané v programu QTSteel jsou uvedeny hodnoty na vnitřním a vnějším obvodu trubky, skutečnost vyjadřuje rozsah dosahovaných naměřených hodnot.

Tab. 15: Porovnání mechanických vlastností trubek

Materiál	Rozměr	Mechanické vlastnosti (QTStell)		Mechanické vlastnosti (skutečnost)		Rozdíl	
	[mm]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Mez kluzu [%]	Mez pevnosti [%]
20MnV6	203,00	643-708	771-800	628-702	754-797	0,9-2,4	0,4 -2,3
20MnV6	355,60	624-732	762-812	684-714	789-805	2,5-9,6	0,9-3,5
20MnV6	193,70	651-730	776-811	609-670	733-770	5,5-6,9	5,3-5,9
42CrMo4	244.50	991-996	1101-1106	867-935	1001-1034	6,5-14,3	7,0-10,0
42CrMo4	203.00	933-941	1036-1046	867	975	7,6-8,5	6,3-7,3

6. Závěr

Po uskutečnění experimentální části této bakalářské práce, lze vyvodit tyto závěry:

- Díky simulaci v programu QTSteel se podařilo navrhnout parametry linky pro nejvyšší výkon pro dosažení požadovaných mechanických vlastností pro ocel 42CrMo6 dle normy ČSN EN 10083-3.
- Další ověřování bude probíhat pro různé průměry tyčí a různé značky ocelí po výstavbě zušlechťovací linky a jejím uvedení do provozu.
- Simulace byly provedeny i pro konvenční způsob zpracování tyčí a trubek, kde byly poskytnuty potřebné údaje. Výrobce programu QTSteel udává přesnost výpočtů 10%. Porovnáním s reálnými hodnotami u tyčí a trubek lze konstatovat, že dosahované hodnoty se liší jen nepatrně a až na výjimky je dosaženo odchylky do 10%.

7. Použitá literatura

- [1] RUDNEV, Valery. *Handbook of induction heating*. New York: Marcel Dekker, c2003, xi, 777 p. ISBN 08-247-0848-2.
- [2] HOLM, T.; OLSSON, P.; TROELL, E.: *Steel and its Heat Treatment - a handbook*. Mölndal: Swerea IVF, 2012. ISBN 987-91-86401-11-5.
- [3] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*, Brno: CERM, 2002. 392s. ISBN 80-7204-248-3.
- [4] PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu I*, Brno: CERM, 2003. 505s. ISBN 80-7204-283-1.
- [5] SPECHT, F R. Maintenance of induction heat treatment systems. *Metallurgia*. 0141-8602, roč. 68, č. 8. ISSN 0141-8602.
- [6] RUDNEV, V I, D LOVELESS a B MARSHALL. Gear heat treatment by induction. In: BELL, Tom, J COHEN, Kiyoshi FUNATANI a George E TOTTEN. Heat treating: including advances in surface engineering, an international symposium in honor of Professor Tom Bell, and Professor Jerome B. Cohen Memorial Symposium on Residual Stresses in the Heat Treatment Industry : proceedings of the 20th conference, 9-12 October 2000, St. Louis, Missouri. Materials Park, OH: ASM International, c2000, s. 862-871. ISBN 0871707276.
- [7] COUPARD, Dominique, Thierry PALIN-LUC, Philippe BRISTIEL, Vincent JI a Christian DUMAS. Residual stresses in surface induction hardening of steels: Comparison between experiment and simulation. DOI: 10.1016/j.msea.2007.10.047. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921509307017534>
- [8] GRUM, Janez, Thierry PALIN-LUC, Philippe BRISTIEL, Vincent JI a Christian DUMAS. Overview of residual stresses after induction surface hardening: Comparison between experiment and simulation. *International Journal of Materials and Product Technology*. 2007, roč. 29, 1/2/3/4, s. 9-. ISSN 0268-1900. DOI: 10.1504/IJMPT.2007.013129.
Dostupné z: <http://www.inderscience.com/link.php?id=13129>
- [9] KIM, W-B a S-J NA. A study of residual stresses in the surface hardening of a blade mould by high frequency induction heating. *Surface*. 1993, roč. 58, č. 2. ISSN 0257-8972.
- [10] TŘINECKÉ ŽELEZÁRNY – MORAVIA STEEL. Skupina Třinecké železářny – Moravia Steel [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: www.trz.cz
- [11] SOCHOROVÁ VÁLCOVNA TŽ, a.s. Sochorová válcovna TŽ [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://sochorova.trz.cz/>
- [12] Třinecké železářny: Válcovna trub [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.tube.cz/>

- [13] QTSteel 3.2 – Uživatelská příručka
- [14] Prezentace společnosti Ajax Tocco Magnethermic: Overview
- [15] Učební podklady předmětu DTZ
- [16] ČSN EN 10083-3. Oceli k zušlechťování: Část 3: Technické dodací podmínky pro legované oceli. Praha: Český normalizační institut, 2007

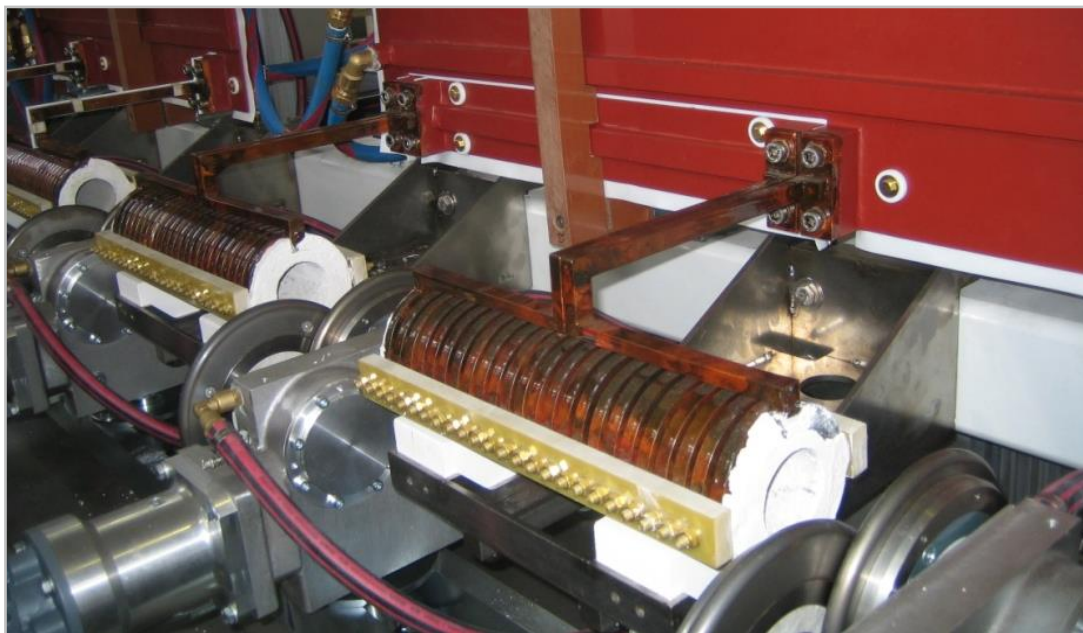
8. Seznam použitých zkratk

ARA	anizotermický rozpad austenitu
Re	mez kluzu, [MPa]
Rm	mez pevnosti, [MPa]
A5	tažnost, [%]
Z	kontrakce, [%]
HTC	součinitel přestupu tepla, [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]

9. Seznam příloh

Obr. P1	Příklad indukční cívky
Obr. P2	Příklad indukčních cívek v lince
Obr. P3	Příklad indukčních cívek v lince
Obr. P4	Příklad ochlazování po kalení a popouštění
Obr. P5	Příklad cívek pro ohřev malých průměrů
Obr. P6	Příklad cívek pro ohřev malých průměrů

10. Přílohy



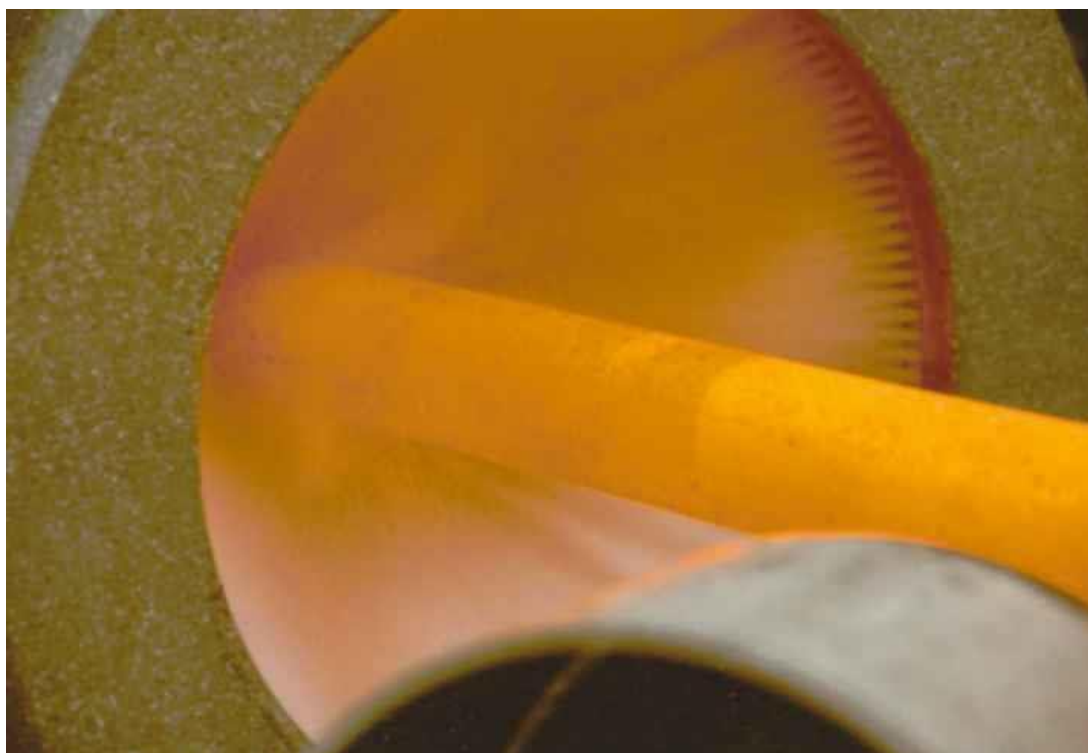
Obr. P1 Příklad indukční cívky



Obr. P2 Příklad indukčních cívek v lince



Obr. P3 Příklad indukčních cívek v lince



Obr. P4 Příklad ochlazování po kalení a popouštění



Obr. P5 Příklad cívek pro ohřev malých průměrů



Obr. P6 Příklad cívek pro ohřev malých průměrů